

自律分散型サプライチェーンにおけるプレイヤー の意思決定の違いがサプライチェーンの経済性 に及ぼす影響の調査

東京理科大学 創域理工学研究科 経営システム工学専攻
嶋村 光騎, 石垣 綾, 渡部 大哉

2種類のサプライチェーンモデル

中央集権型モデル - ➤ Chen et al.(2000)



➡ モノの流れ
← 情報の流れ

サプライチェーン全体を中央管理者が集中的に管理し、一元的に意思決定を行う

- サプライチェーン全体のパフォーマンス向上
- ▲ 各段階別にみるとパフォーマンスが悪い部分がある

自律分散型モデル - ➤ Ponte et al.(2017)



➡ モノの流れ
← 情報の流れ

サプライチェーンの各段階が自律的に意思決定をする

- 各段階による自身のパフォーマンス向上
- 企業間の合意があれば公平性に関する交渉や協力など柔軟に対応が可能
- ▲ 各段階の発注者の意思決定によりブルウィップ効果が発生する

本研究で扱うサプライチェーンモデル

近年、複数の企業と同時に取引することから
全体で協力する**中央集権型モデル**は難しい



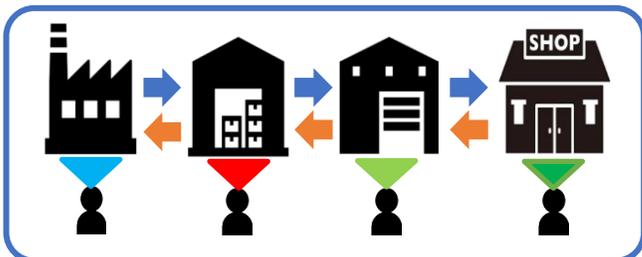
本研究では**自律分散型モデル**に着目！



モノの流れ
情報の流れ

自律分散型モデル

➤ Ponte et al.(2017)



モノの流れ
情報の流れ

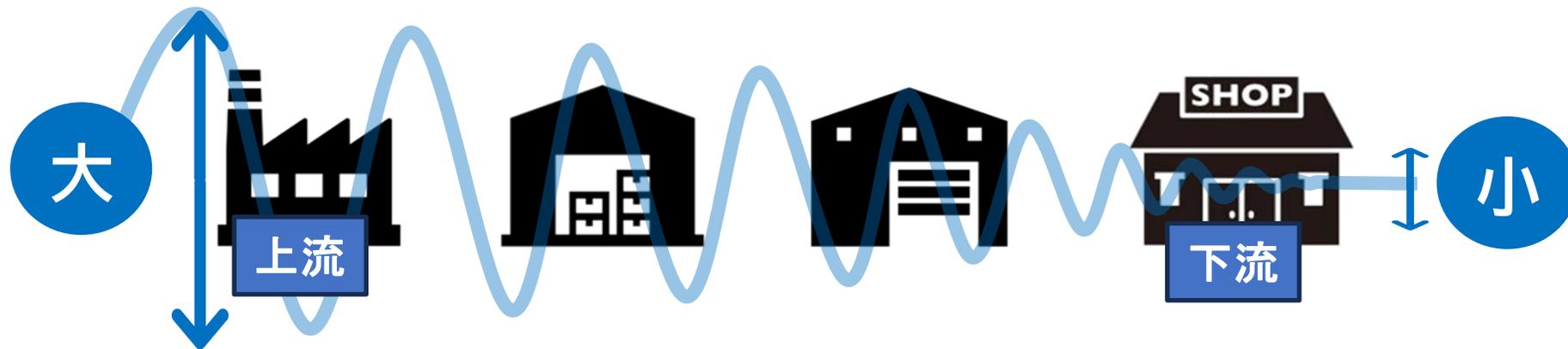
サプライチェーンの各段階が自律的に意思決定をする

- 各段階による自身のパフォーマンス向上
- 企業間の合意があれば公平性に関する交渉や協力など柔軟に対応が可能
- ▲ 各段階の**発注者の意思決定**により**ブルウィップ効果**が発生する

ブルウィップ効果とは

ブルウィップ効果^[1]

サプライチェーンの下流では**需要変動**が小さいのに
上流では必要以上に変動が大きくなる現象



サプライチェーンのパフォーマンスに多大な悪影響を及ぼし、過剰な在庫レベルなどの
関連コストの増加をもたらす

ブルウィップ効果はサプライチェーンマネジメントが抱える最大の課題の1つ^[2]

Lee(1997)

発注者の意思決定の分類

在庫管理に対するリスクの思考により戦略タイプを分類 Tajima(2020)

□ 戦略タイプA(リスク回避型)

一定の在庫量を保ち、品切れが発生しないよう行動する戦略

✓ 移動平均予測

⊗ 高い安全在庫

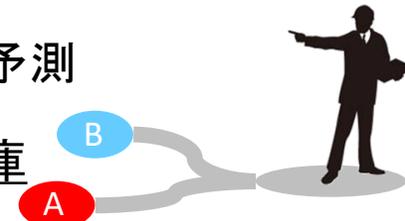


□ 戦略タイプB(リスク愛好型)

過剰在庫を減らし、必要最低限の在庫を保有するよう行動する戦略

✓ 指数平滑化予測

⊗ 低い安全在庫



リスク回避型の人
は品切れを防ぐため
買いだめ行動をする

Cannella et al.,2019

リスク愛好型の人
は品切れをリスクとは
捉えないため買いだめ行動をしない

安全在庫の考え方は先行研究により示されている

発注者の意思決定の分類

在庫管理に対するリスクの思考により戦略タイプを分類 Tajima(2020)

□ **戦略タイプA(リスク回避型)**

一定の在庫量を保ち、品切れが発生しないよう行動する戦略

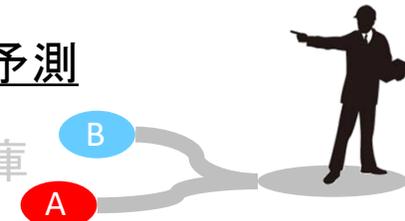
- ✓ 移動平均予測
- ✓ 高い安全在庫



□ **戦略タイプB(リスク愛好型)**

過剰在庫を減らし、必要最低限の在庫を保有するよう行動する戦略

- ✓ 指数平滑化予測
- ✓ 低い安全在庫



しかし、需要予測方法は**定量的**に決められておらず正しいかは不明

本研究の目的



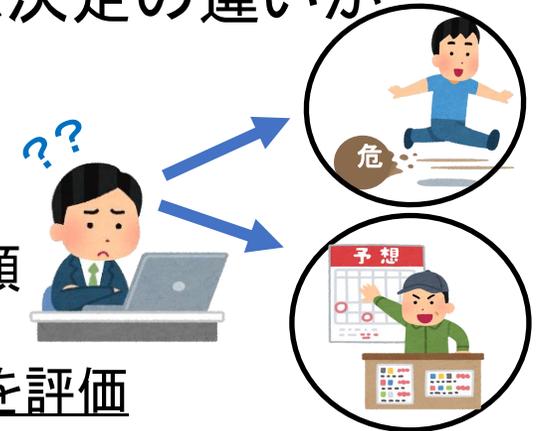
本研究の目的

- 自律分散型サプライチェーンにおけるプレイヤーの意思決定の違いがサプライチェーンの経済性に及ぼす影響の調査をする

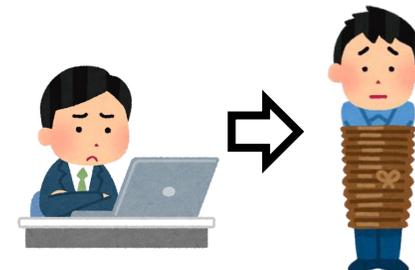
Step1 サプライチェーンにおける発注者のリスク思考を定量化して分類

Step2 定量化して分類した各モデルでの※サプライチェーンの経済性を評価

Step3 発注者の意思決定に依存しないような制約を構築しブルウィップ効果の抑制度合を評価



※経済性の評価にはブルウィップ効果および総費用を用いる



Step1の目的



本研究の目的

- 自律分散型サプライチェーンにおけるプレイヤーの意思決定の違いがサプライチェーンの経済性に及ぼす影響の調査をする



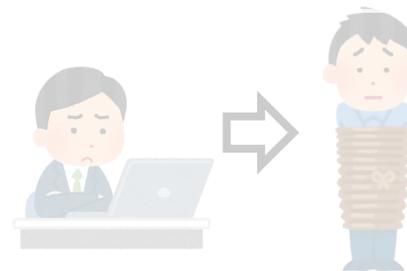
Step1 サプライチェーンにおける発注者のリスク思考を定量化して分類



Step2 定量化して分類した各モデルでの※サプライチェーンの経済性を評価

Step3 発注者の意思決定に依存しないような制約を構築しブルウィップ効果の抑制度合を評価

※経済性の評価にはブルウィップ効果および総費用を用いる



リスク回避度の測定方法

リスク回避度の測定

本研究ではBeckerら(1964)により提案されたBDM法を採用

「10%の確率で当たりとなり、1万円の賞金が貰えますが、外れた場合には何も貰えないくじがあります。このくじが200円で売られていた場合、買いますか？ 買いませんか？」

買う



買ってもいい最大価格は？

買わない



いくらまで安くなったら買う？

期待値を変えずに9パターンの当選確率と当選額で質問を行った

Cramer et al.(2002)

$$RA = \frac{aZ - p}{\frac{1}{2}(aZ^2 - 2aZp + p^2)}$$

a : 当選確率
 Z : 当選額
 p : 回答額

分類方法

RA=正 リスク回避型
RA=0 リスク中立型
RA=負 リスク愛好型

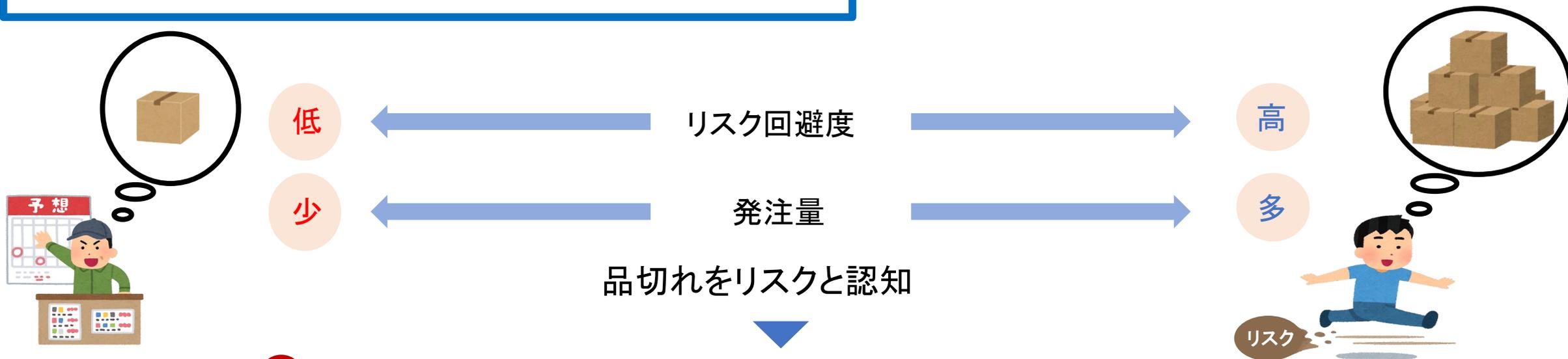
Step1: リスク思考の定量化

先行研究でのリスク回避度と発注量の関係

期待効用理論に基づくリスク回避度測定のテストを実施

- Di Mauro et al.(2019)
- Cannella et al.(2018)

人間は常に期待効用の大きさに基づいて意思決定を行う



○ 品切れ(リスク)を回避しようと多めに発注すること

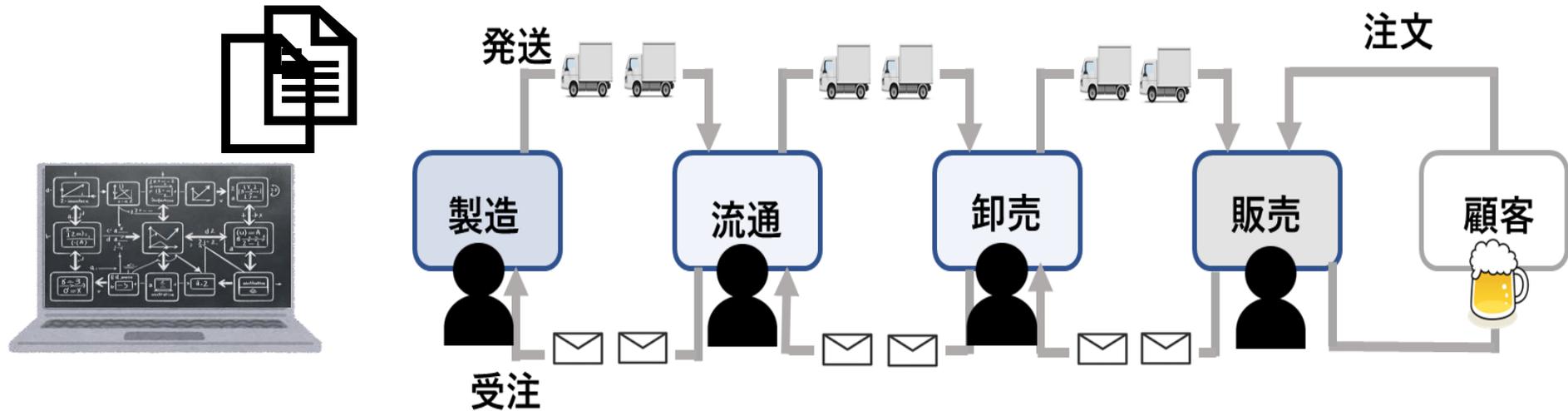
▲ 被験者が在庫状態に応じてどのように発注を行っているかが明らかでない

在庫状態に応じた発注方法を明らかにするためにビールゲームを実施する

ビールゲームとは

ビールゲーム

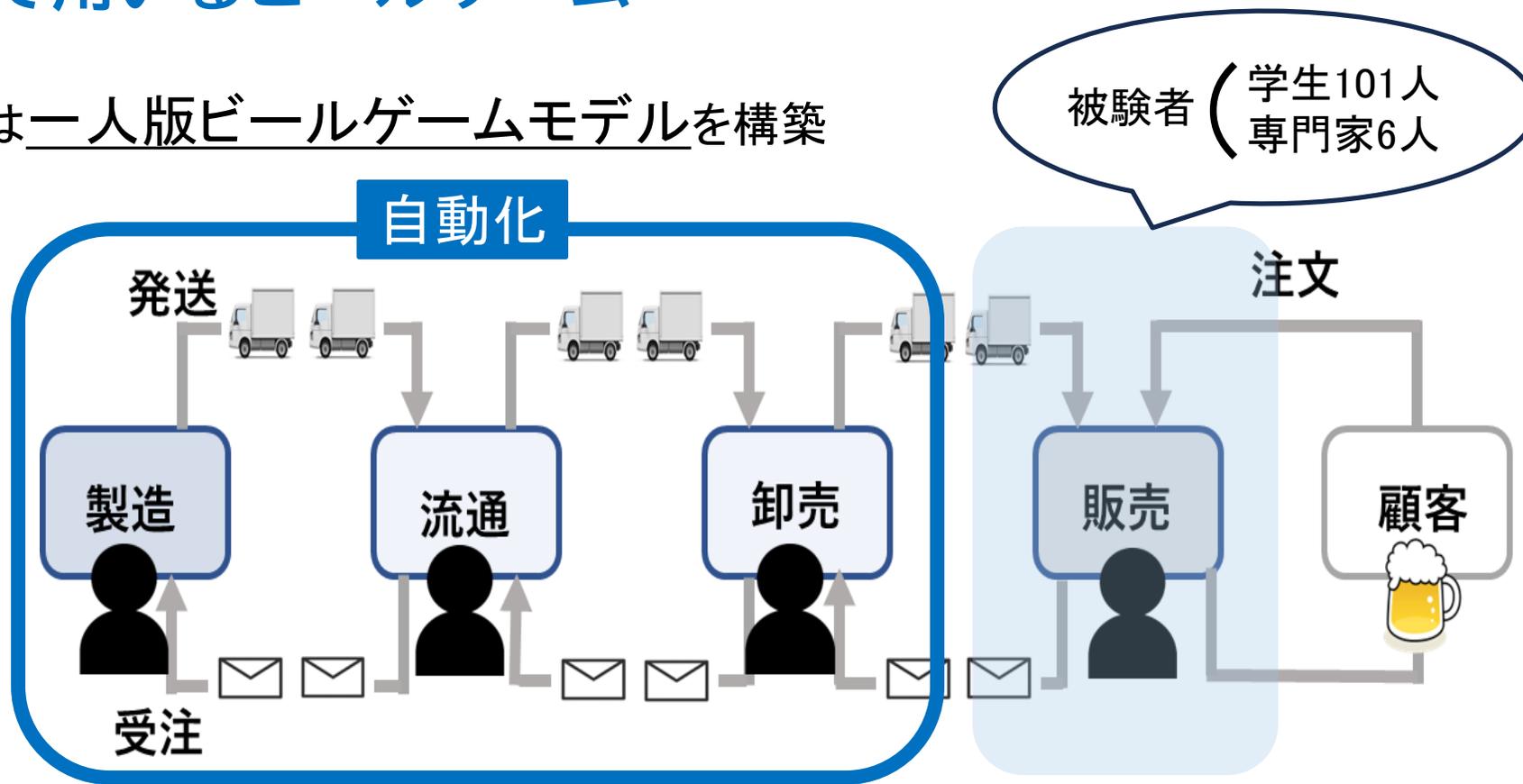
4人のプレイヤーがサプライチェーン内の企業に扮して発注行動を行うゲーム



- プレイヤーの意思決定過程を実際に分析することで、リスク回避の傾向と発注戦略を明らかにすることが可能

本研究で用いるビールゲーム

本研究では一人版ビールゲームモデルを構築



リスク回避と意思決定との関係を明確化するため全被験者が小売でシミュレーション

Step1: リスク思考の定量化

1人用ビールゲームでの実験結果

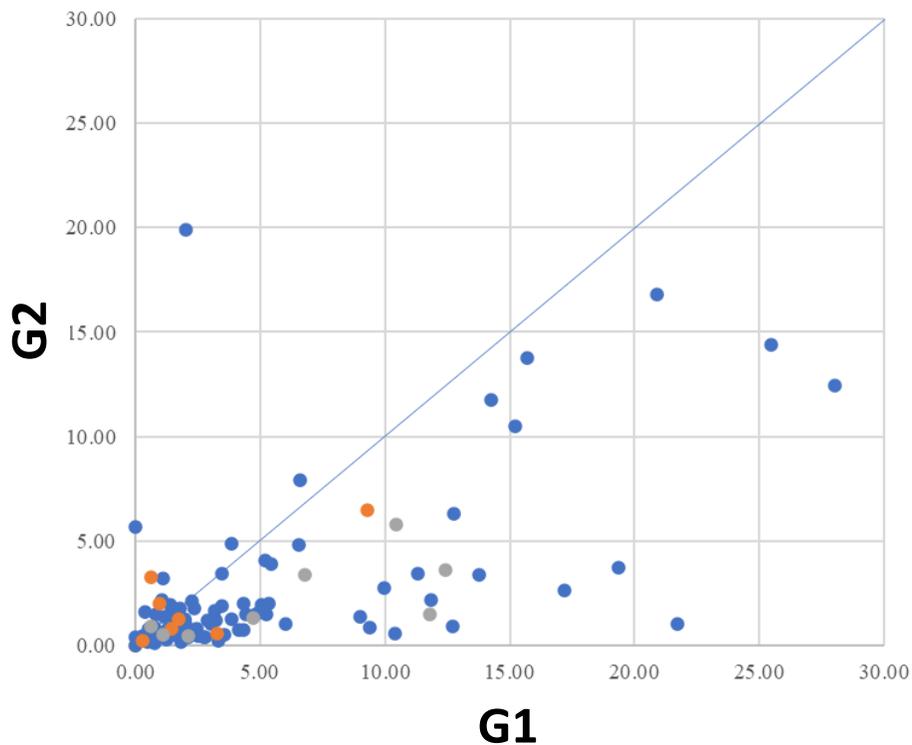


図. 発注量分散



表. リスク回避度別の分散の平均値

平均値	回避型	中立, 愛好
	5.18	4.92
	5.16	4.70

リスク回避型の方が分散の値が大きい → 発注変動が大きい

リスク回避型

需要の取りこぼしを危惧し、需要に追随しているため発注変動増幅の可能性が示唆

実験結果から戦略タイプを分類

在庫管理に対するリスクの思考により戦略タイプを分類 Tajima(2020)

□ 戦略タイプA(リスク回避型)

一定の在庫量を保ち、品切れが発生しないよう行動する戦略

- ✓ 移動平均⁽¹⁾予測
- ✓ 高い安全在庫

実験結果より逆では？

□ 戦略タイプB(リスク愛好型)

過剰在庫を減らし、必要最低限の在庫を保有するよう行動する戦略

- ✓ 指数平滑化⁽²⁾予測
- ✓ 低い安全在庫



需要予測方法

- (1) 移動平均予測 → 過去のデータはすべて同じ価値
- (2) 指数平滑化予測 → 直近のデータ程重要



実験結果

リスク回避型 → 需要変動を追従する
直近のデータ重要

リスク愛好型 → 需要変動を追従しない
過去のデータは同じ

実験結果から発注者の意思決定を分類

本研究 在庫管理に対するリスクの思考により戦略タイプを分類

□ 戦略タイプA(リスク回避型)

一定の在庫量を保ち、品切れが発生しないよう行動する戦略

✓ **指数平滑化** 予測

✓ 高い安全在庫



□ 戦略タイプB(リスク愛好型)

過剰在庫を減らし、必要最低限の在庫を保有するよう行動する戦略

✓ **移動平均** 予測

✓ 低い安全在庫



需要予測方法

(1) 移動平均予測 → 過去のデータはすべて同じ価値

(2) 指数平滑化予測 → 直近のデータ程重要



実験結果

リスク回避型 → 需要変動を追従する
直近のデータ重要

リスク愛好型 → 需要変動を追従しない
過去のデータは同じ

Step2, 3の目的



本研究の目的

- 自律分散型サプライチェーンにおけるプレイヤーの意思決定の違いがサプライチェーンの経済性に及ぼす影響の調査をする



Step1 サプライチェーンにおける発注者のリスク思考を定量化して分類

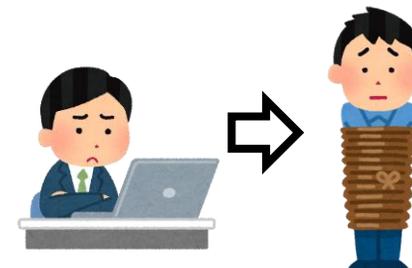


Step2 定量化して分類した各モデルでの※サプライチェーンの経済性を評価



Step3 発注者の意思決定に依存しないような制約を構築しブルウィップ効果の抑制度合を評価

※経済性の評価にはブルウィップ効果および総費用を用いる



本研究におけるモデル概要

Step2



○ Step1により分類した結果をもとにSCの経済性を評価

Step3

○ 発注者への制約



マルチエージェントシステム



ブルウィップ効果・総費用(品切・在庫保管費)

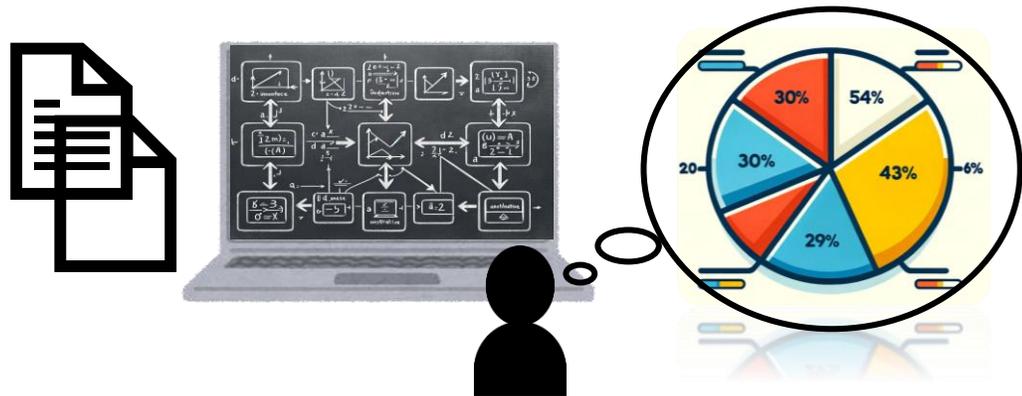


S⁴ Simulation Systemを活用する!

ブルウィップ効果抑制の評価手法

数理最適化

Chen et al. (2000)
Trapero et al.(2012)



問題を数式で表し、制約条件を満たしたもとで最適解を求める評価方法

○ 中央集権型モデル



で多く使われる

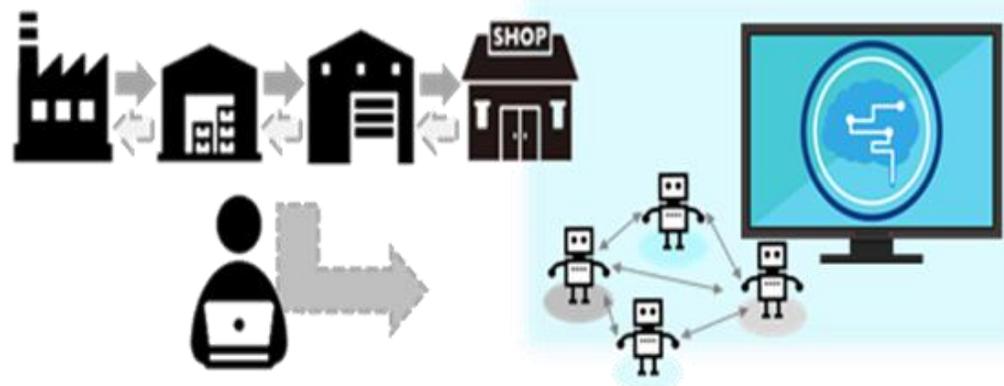
▲ 自律分散型モデル



を構築することは難しい

マルチエージェントシステム

Ponte et al. (2017)
Dominguez et al.(2012)



異なる特徴を持った自律的エージェントの相互作用をシミュレーションする評価方法

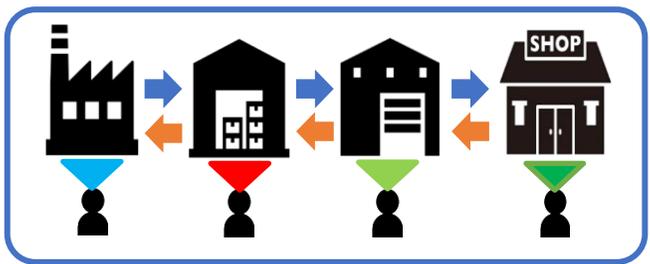
各段階が独立した行動(自律分散型)モデルの構築が可能



本研究ではマルチエージェントシステムを用いて評価

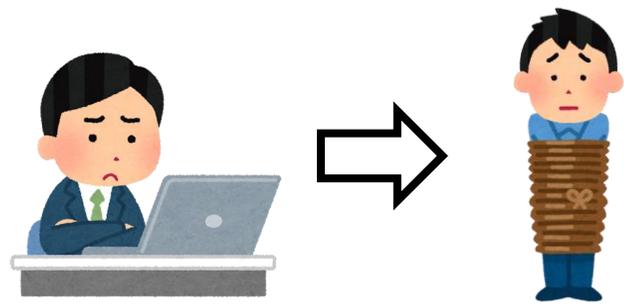
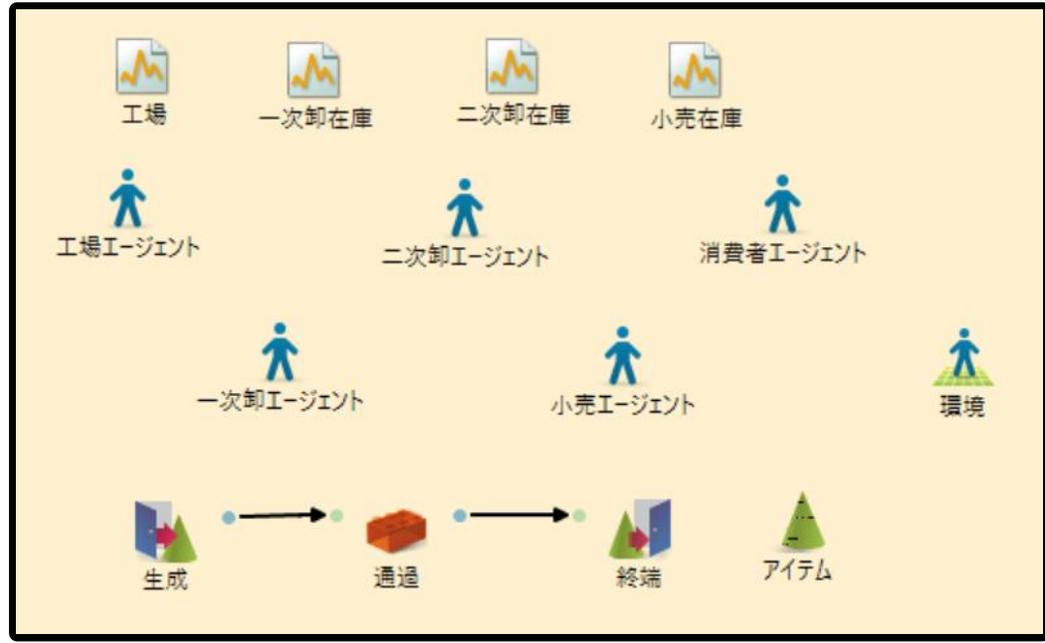
自律分散型モデルの構築

S⁴ Simulation System



非同期エージェントを用いて自律分散型サプライチェーンモデルを構築

- 各段階(工場・卸売1,2・小売)と消費者エージェントを生成する
- 各エージェントの意志決定を行動ルールとして設定する
- 各エージェントの意志決定に制約を加えたモデルを構築する



本研究で用いる戦略タイプ

○ 戦略傾向

Step1の結果に基づき2つに分類

本研究ではリスク=品切れ

SOLDOUT

戦略タイプA(リスク回避型)



- ◆ 過去の需要に追随し、発注する

➡ 指数平滑化予測

- ◆ 買いだめ行動をする

➡ 安全在庫が高い

戦略タイプB(リスク愛好型)



- ◆ 過去の需要に追随せずに、発注する

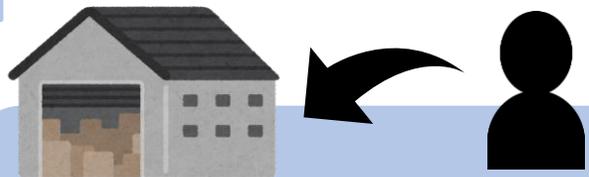
➡ 移動平均予測

- ◆ 買いだめ行動をしない

➡ 安全在庫が低い

Step2, 3: 定量化モデルを用いたSCの経済性

マルチエージェントにおけるプレイヤーの行動



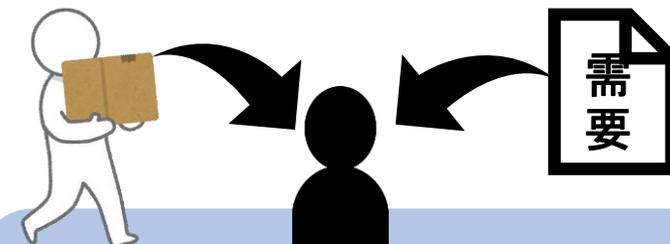
製品の発送
下流へ製品を発送



手順2



手順1

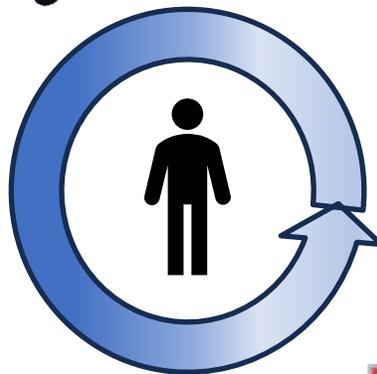


製品・需要の受取
上流→製品
下流→需要



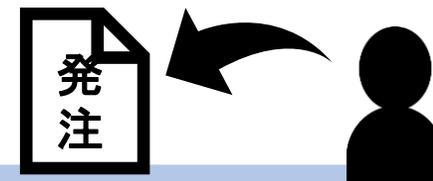
在庫情報の更新
・手持ち在庫
・未納入在庫
・受注残

手順3



手順4

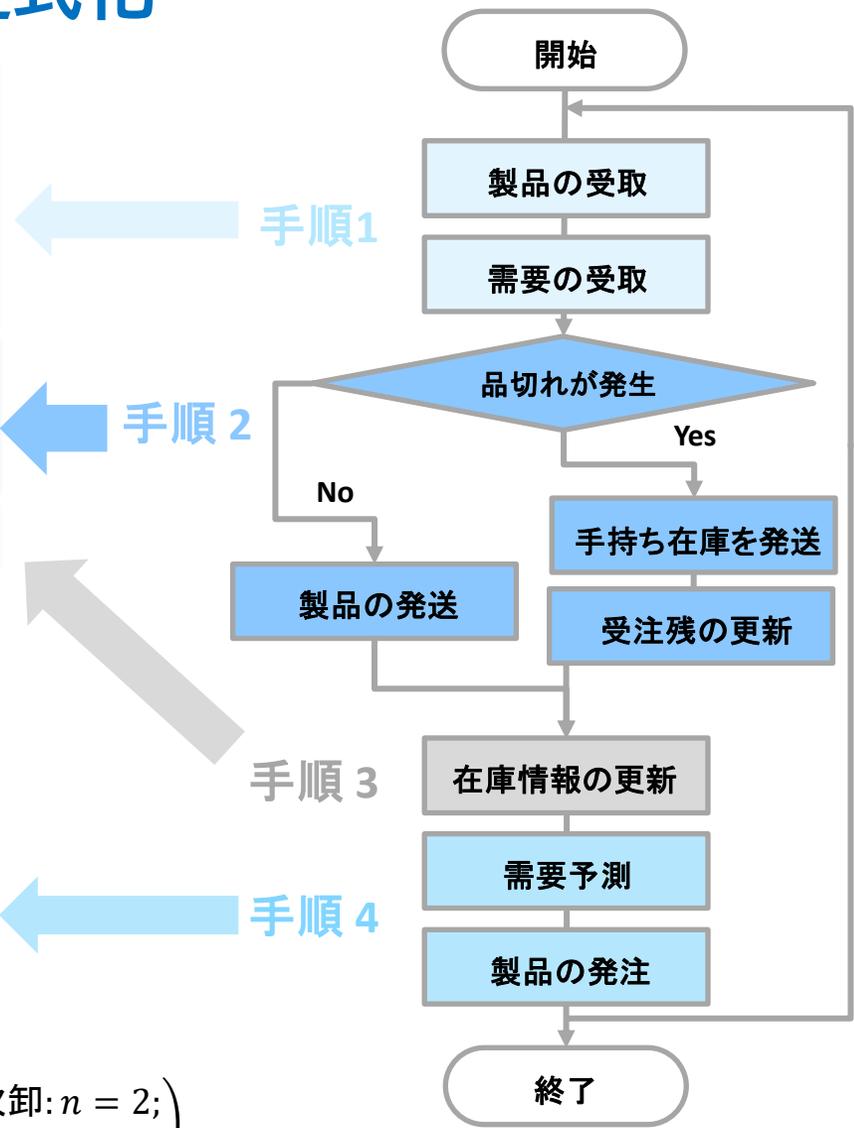
更新



製品発注
算出→
・需要予測量
・目標在庫
上流へ製品発注

マルチエージェントシステムにおける定式化

納入量	$R_n(t) = \begin{cases} S_{n-1}(t-l), & n \geq 2 \\ O_n(t-l), & n = 1 \end{cases}$
需要量	$D_n(t) = O_{n+1}(t-1)$
手持ち在庫	$I_n(t) = I_n(t-1) + R_n(t) - S_n(t)$
発送量	$S_n(t) = \min\{D_n(t) + B_n(t-1), I_n(t-1) + R_n(t)\}$
受注残	$B_n(t) = B_n(t-1) + D_n(t) - S_n(t)$
受注在庫量	$W_n(t) = W_n(t-1) + O_n(t-1) - R_n(t)$
移動平均予測	$F_n(t) = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m-1} D_n(t-i)$
指数平滑化 予測	$F_n(t) = f * D_n(t-1) + (1-f) * F_n(t-1)$ $= F_n(t-1) + f * \{D_n(t-1) - F_n(t-1)\}$
目標在庫量	$Y_n(t) = a * F_n(t) + SS_n + (l-1) * F_n(t)$ $= l * F_n(t) + SS_n$
発注量	$O_n(t) = \max\{Y_n(t) - [I_n(t) - B_n(t) + W_n(t)], 0\}$



手順1

手順2

手順3

手順4

n : サプライチェーン内の階層 N : 総階層数
 l : リードタイム t : 時間 SS_n : 安全在庫
 a : 発注間隔 m : 移動平均期間 f : 平滑化係数

$$N = 4 \left(\begin{array}{l} \text{工場: } n = 1; \text{ 一次卸: } n = 2; \\ \text{二次卸: } n = 3; \text{ 小売: } n = 4 \end{array} \right).$$

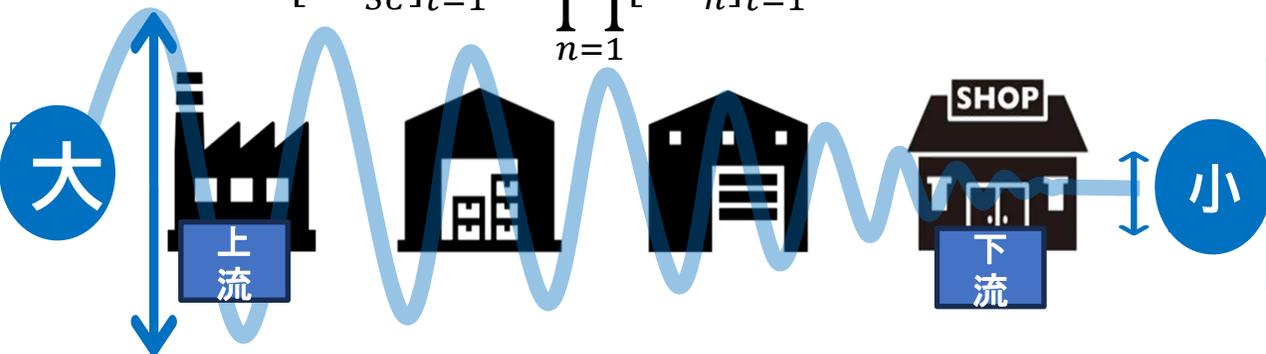
サプライチェーンの経済性の評価方法

□ ブルウィップ比率

発注量と需要量の分散の比率で定義され
平均値で調整する

$$[BE_n]_{t=1}^{t=T} = \left[\frac{Var(O_n)/Avg(O_n)}{Var(D_n)/Avg(D_n)} \right]_{t=1}^{t=T}$$

$$[BE_{SC}]_{t=1}^{t=T} = \prod_{n=1}^N [BE_n]_{t=1}^{t=T}$$



□ 総費用

各プレイヤーの在庫保管費と品切れ費を考慮する

$$TC_{SC} = p * \sum_{n=1}^N [I_n]_{t=1}^{t=T} + q * \sum_{n=1}^N [B_n]_{t=1}^{t=T}$$

$(p < q)$

n : サプライチェーン内の階層 t : 時間 Var : 分散値
 N : 総階層数 D_n : 需要量 B_n : 受注残 Avg : 平均値
 O_n : 発注量 I_n : 手持ち在庫 T : 総時間
 p : 在庫保管費(円/個・日) q : 品切れ費(円/個・日)

各パラメータの設定

戦略タイプA(リスク回避型)



➡ 指数平滑化予測
➡ 安全在庫が高い

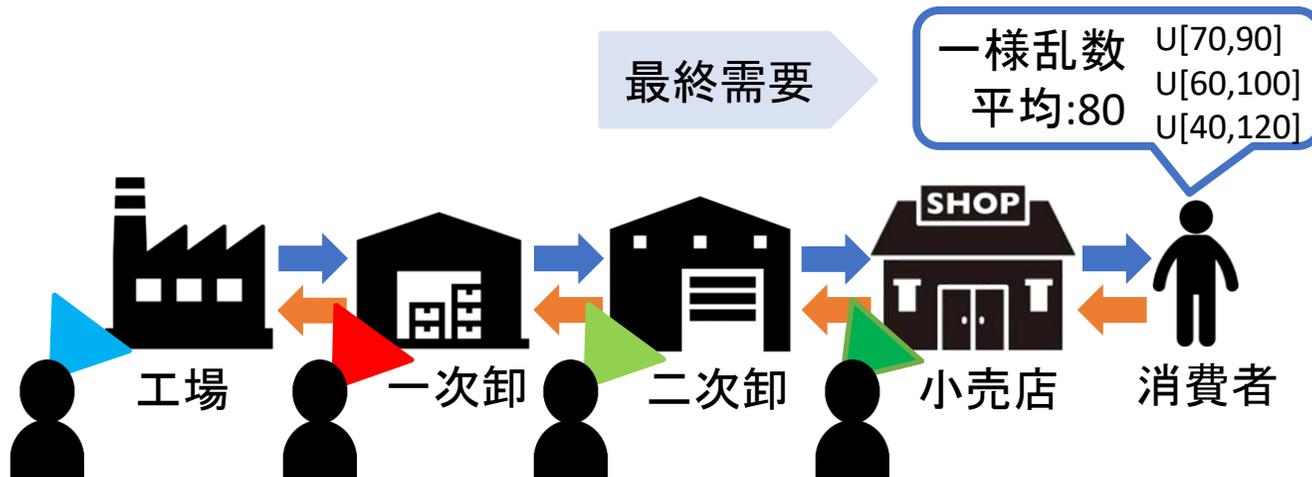
平滑化係数: $f = 0.40$
安全在庫=25(個)

戦略タイプB(リスク愛好型)



➡ 移動平均予測
➡ 安全在庫が低い

移動平均期間: $m=5$
安全在庫=15(個)



在庫保管費: $p = 1$ (円/個・日)

品切れ費: $q = 2$ (円/個・日)

発注間隔: $a = 1$

リードタイム: $l = 2$

シミュレーション数: $T = 500$

Step2のシミュレーション実験

Step2



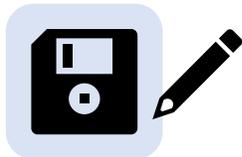
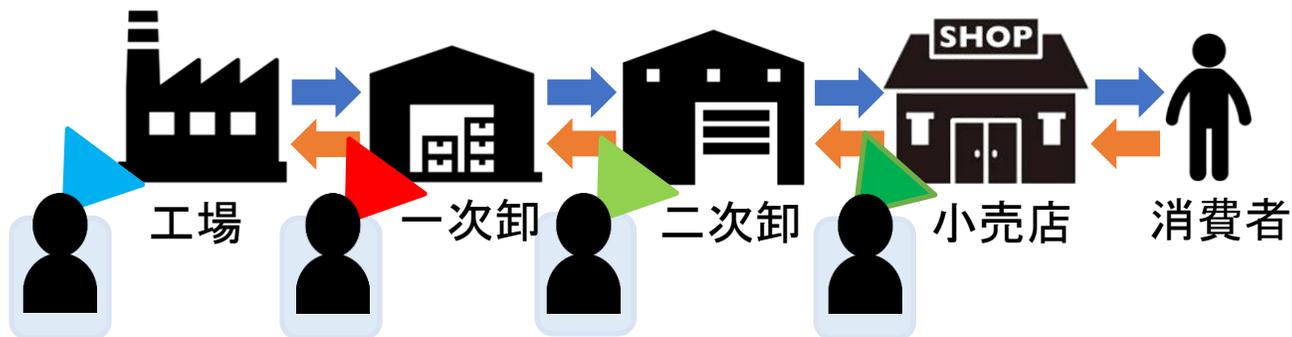
○ Step1により分類した結果をもとにSCの経済性を評価

Step3

○ 発注者への制約



マルチエージェントシステム



ブルウィップ効果・総費用(品切・在庫保管費)



S⁴ Simulation System

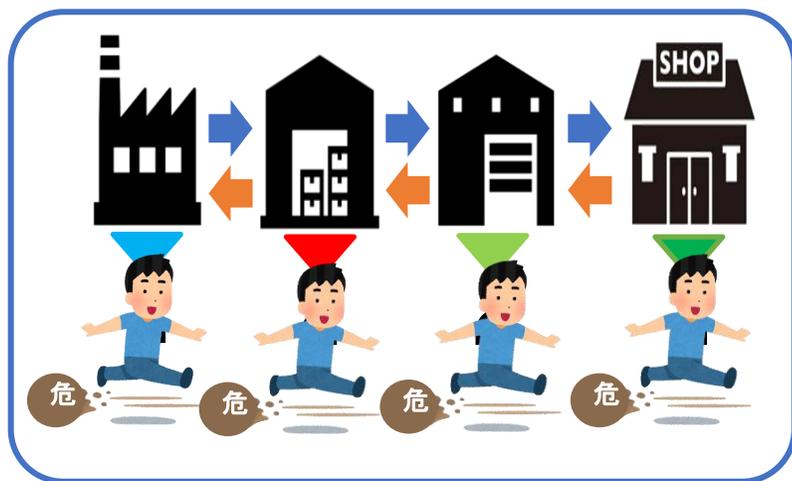
S⁴ Simulation Systemを活用する!

Step2のシミュレーション実験

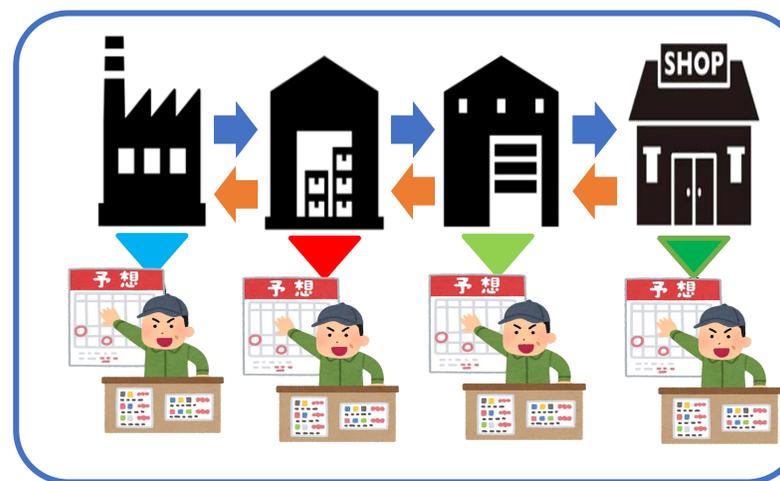


Step2 定量化して分類した各モデルでのサプライチェーンの経済性を評価

戦略タイプA(リスク回避型)



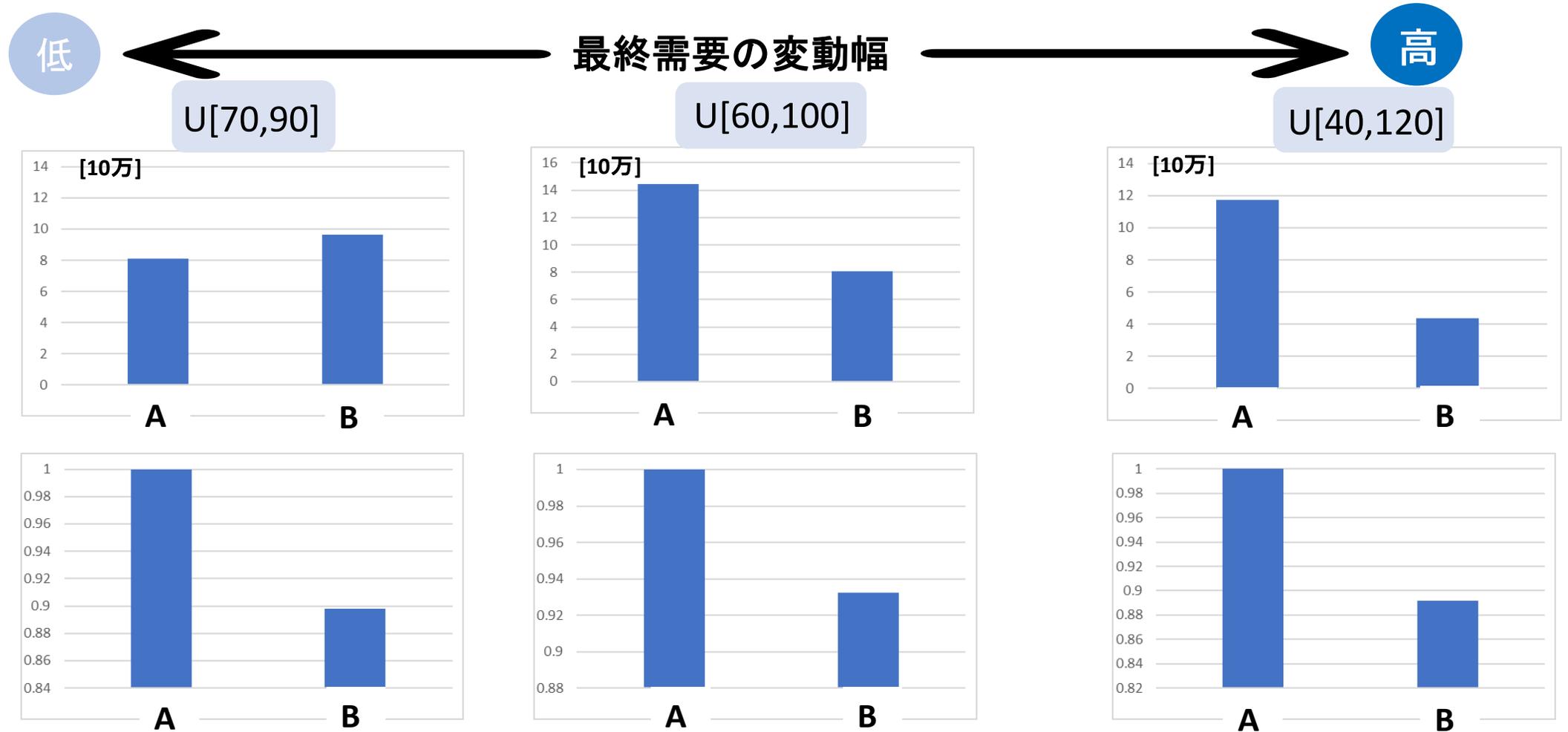
戦略タイプB(リスク愛好型)



経済性の評価にはブルウィップ効果および総費用を用いる

Step2, 3: 定量化モデルを用いたSCの経済性

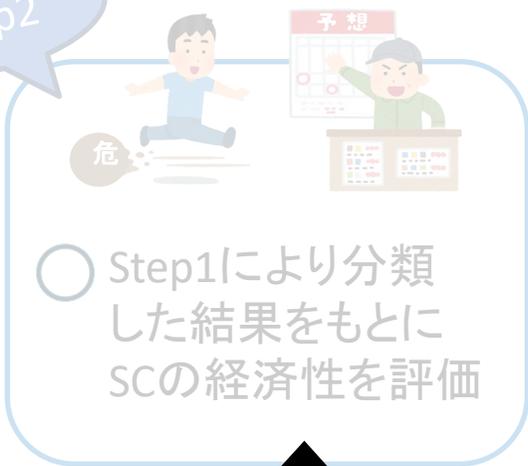
Step2, シミュレーション結果(ブルウィップ比率, 総費用)



💡 リスク愛好型(B)の方が、総費用・ブルウィップ効果を抑制可能

Step3のシミュレーション実験

Step2



Step3



マルチエージェントシステム



S⁴ Simulation Systemを活用する!

Step3のシミュレーション実験



Step3 発注者の意思決定に依存しないような制約を構築しブルウィップ効果の抑制度合を評価



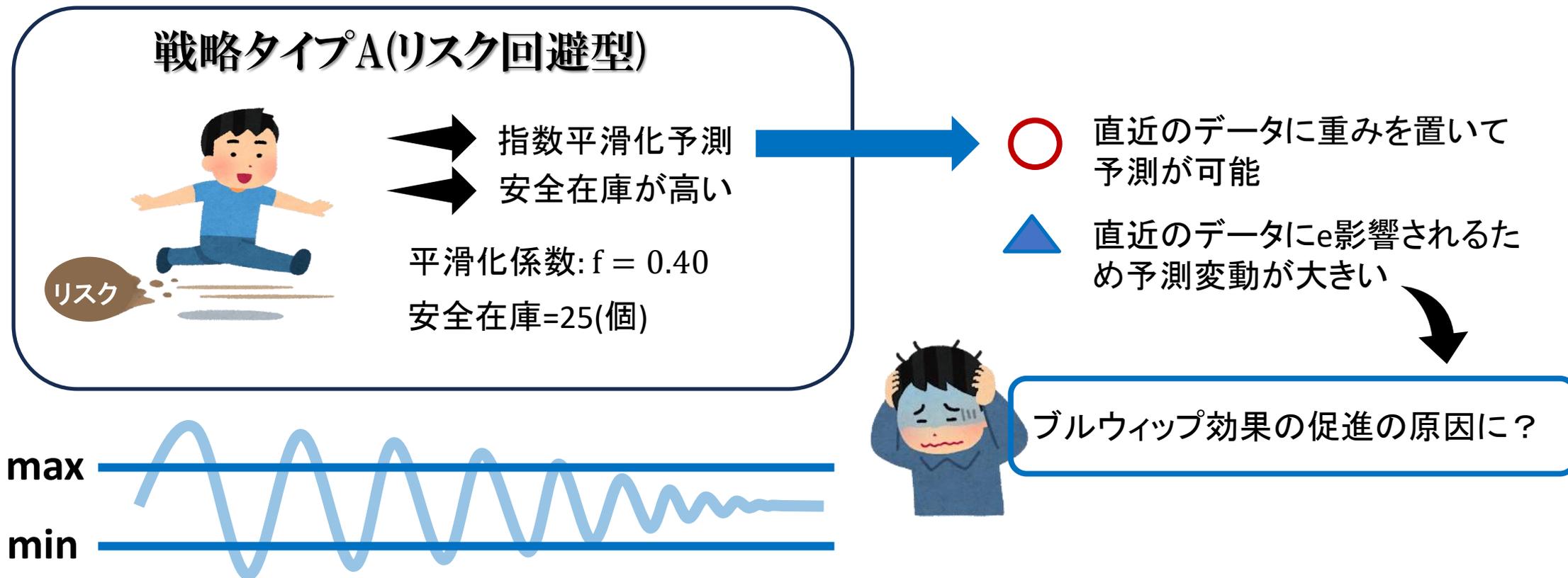
Step2の結果より戦略タイプB(リスク愛好型)の方が経済性が良いことが判明



Step3では、戦略タイプAが戦略タイプBのようなふるまいをする制約を構築する



戦略タイプAの課題



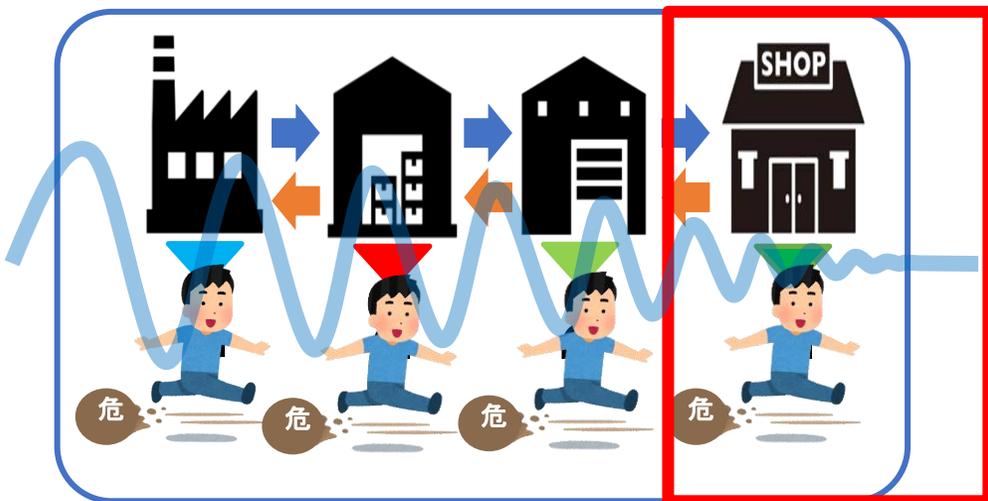
発注数に制約をかけることでブルウィップ効果の抑制につながるのでは...?

Step3, 意思決定の制約の構築

ブルウィップ効果

サプライチェーンの下流では**需要変動**が小さいのに
上流では必要以上に変動が大きくなる現象

➡ サプライチェーンの下流の需要変動を抑制すればブルウィップ効果も小さくなるのでは？



💡 本研究では、小売店の発注数のみ制約をかけてブルウィップ効果の抑制度合を評価する

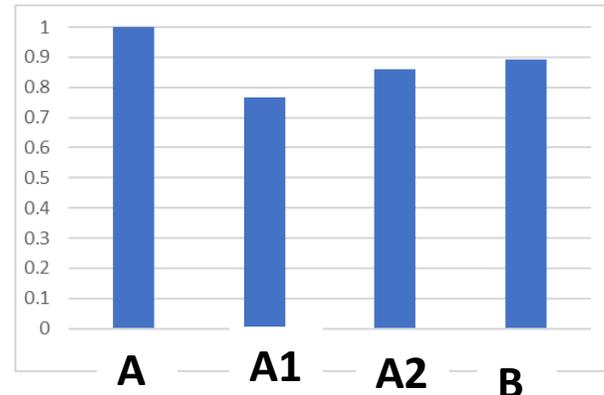
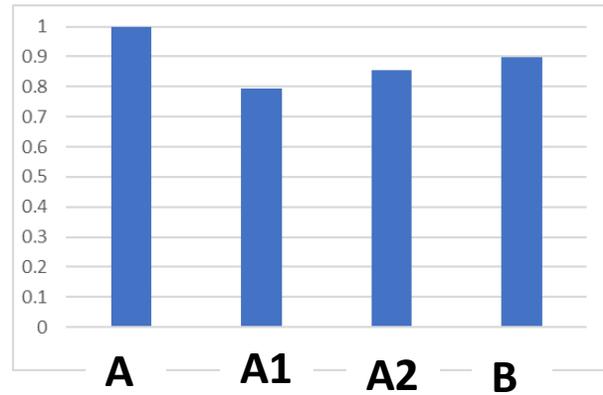
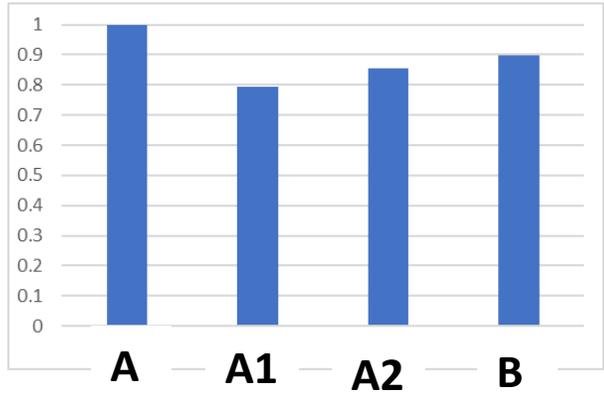
- A1** 最大値が一樣乱数の平均(80)
- A2** 最大値が最終需要の一樣乱数の最大値

Step2, 3: 定量化モデルを用いたSCの経済性

Step3, シミュレーション結果(ブルウィップ比率, 総費用)



BE比
※戦略AのBEを1とした時のBE比



戦略タイプAの発注数の制約により戦略タイプBよりもブルウィップ効果の抑制が可能であることがわかった
発注数の上限が高いとブルウィップ効果の抑制割合は低くなった

本研究のまとめ



本研究の目的

- 自律分散型サプライチェーンにおけるプレイヤーの意思決定の違いがサプライチェーンの経済性に及ぼす影響の調査をする

結果

- サプライチェーンにおける発注者のリスク思考を定量化して分類できた
- 定量化して分類した各モデルでのサプライチェーンの経済性を評価した
- 発注者の意思決定に依存しないような制約を一部構築しブルウィップ効果の抑制を確認

今後の課題

- 今回構築した制約の実証実験を行い、有効性を証明すること
- 各段階における制約を定めることで、多様な発注者の意向に左右されない汎用的なモデルを開発する

參考文獻

- [1] Forrester, Jay W. "Industrial Dynamics. A major breakthrough for decision makers." Harvard business review, Vol.36, No.4, pp.37-66. (1958).
- [2] Lee, H. L., Padmanabhan, V., and Whang, S. "The bullwhip effect in supply chains." Sloan management review, Vol.38, pp.93-102. (1997).
- [3] Jonnson,P.Mattsson, S. "A longitudinal study of material planning applications in manufacturing companies", International Journal of Operations & Production Management, Vol. 26 No. 9, pp. 971-995, (2006),
- [4] Pratt, J.W." Risk aversion in the small and in the large." Econometrica: J. Econ. Vol. 32 No.1–2, pp.122–136.(1964)
- [5] Chen, F., Drezner, Z., and Ryan, J. K., "Quantifying the bullwhip effect in a simple supply chain: The impact of forecasting, lead times, and information." Management science, Vol.46, No.3, pp.436-443. (2000).
- [6] Chen, F., Ryan, J. K., and Simchi-Levi, D. "The impact of exponential smoothing forecasts on the bullwhip effect." Naval Research Logistics (NRL), Vol.47, No.4, pp.269-286. (2000)
- [7]Cannella, S., Di Mauro,C., Dominguez,R, Ancarani, A., Schupp, F. "An exploratory study of risk aversion in supply chain dynamics via human experiment and agent-based simulation." Int. J. Prod. Res. 57 (4), 985–999, (2019)

参考文献

- [8] Michael Becker-Peth, Ulrich W. Thonemann & Torsten Gully. "A note on the risk aversion of informed newsvendors." *Journal of the Operational Research Society*, VOL. 69, NO. 7, 1135–1145, (2018)
- [9] Hult, G.T.M., Ketchen, D.J., Slater, S.F. "A longitudinal study of the learning climate and cycle time in supply chains." *J. Bus. Ind. Market.* 17 (4), 302–323, (2002).
- [10] TAJIMA Erika, ISHIGAKI Aya, TAKASHIMA Ryuta, NISHIDA Hajime, OKAMMOTO Takuya, effectiveness of a Multi-Agent Cooperation Game in a Multi-Stage Supply Chain, *Journal of Japan Industrial Management Association* 73 (4E), 234-250, (2023)
- [11] Trapero, J. R., Kourentzes, N., and Fildes, R. "Impact of information exchange on supplier forecasting performance." *Omega*, Vol.40, No.6, pp.738-747. (2012).
- [12] Trapero, J. R., Kourentzes, N., and Fildes, R. "Impact of information exchange on supplier forecasting performance." *Omega*, Vol.40, No.6, pp.738-747. (2012).