

(株)NTTデータ数理システム 2023年度 学生研究奨励賞

持続可能なサプライチェーンの実現に向けた 公平かつ効率的な企業間協調システムの提案と分析

東京理科大学 創域理工学研究科 経営システム工学専攻

石垣研究室所属 修士1年 瀬瀬潤大

01 背景
Introduction

02 研究の位置づけと目的
Research Positioning

03 提案手法：シミュレーションモデル
Simulation Model

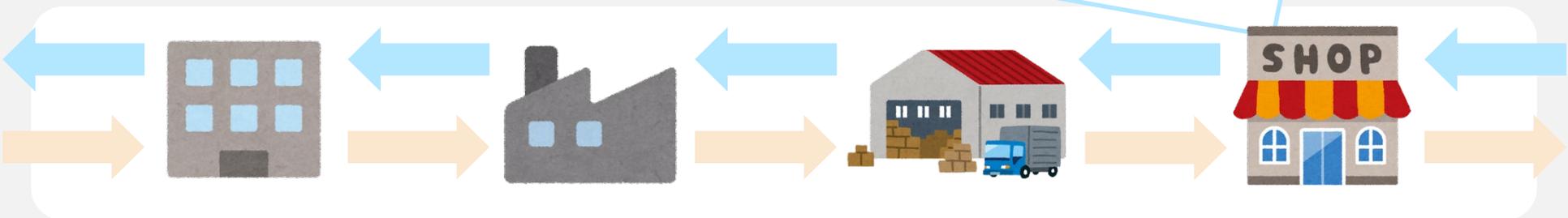
04 提案手法：最適化モデル
Optimization Model

05 有効性の検証
Result & Discussion

06 結論
Conclusion

サプライチェーンとは？

2



モノを消費者に供給するための、「需要と販売」「注文と供給」が連鎖する一連の流れ

➡ サプライチェーン (SC)

サプライチェーンに求めるもの

社会のSCに対する要求

大量生産大量消費

適正生産適正消費

Now!
持続可能性

例えば...

NTTグループサプライチェーンサステナビリティ推進ガイドライン^[1]の項目

- I. 人権・労働
- II. 安全衛生
- III. 環境
- IV. 公正取引・倫理
- V. 品質・安全性
- VI. 情報セキュリティ
- VII. 事業継続計画の策定

持続可能性が持つ意味は...

- ✓ 経済性
- ✓ 環境性
- ✓ 倫理性
- ✓ 柔軟性
- ✓ 強靱性

などなど...

多種多様かつ
相反する要素も包含

長く複雑なグローバルSC + 多種多様な意味を持つ持続可能性

利害関係の異なる複数企業間の**協調**が必須！

将来的な研究の最終目的

協調が必須！



そんな簡単に協調できたら苦労はしない...

協調における大まかな課題

(i) 長く複雑なSCの可視化

- ✓ SCを構成する企業は、扱う製品、品番、基幹システムなど、あらゆるものが違う
- ✓ それらをすり合わせ、安全かつわかりやすく情報共有ができる基盤が必要

(ii) 効率的な協調の決定方法

- ✓ SCが可視化されても、協調に至るまでの合意形成に必要なコスト、時間が大きい
- ✓ 動的に変化し続けるSCで協調し続けるには、効率的な協調決定方法が必要

(iii) 公平性の担保

- ✓ 協調によって負担が増えたり、コストが増加するならば、企業は協調しなくなる
- ✓ 全ての企業が協調できるよう、協調が公平であることを客観的に担保すべき

研究の最終目的は...

(i) ~ (iii) の課題を達成できる企業間協調システムの提案

01 背景
Introduction

02 研究の位置づけと目的
Research Positioning

03 提案手法：シミュレーションモデル
Simulation Model

04 提案手法：最適化モデル
Optimization Model

05 有効性の検証
Result & Discussion

06 結論
Conclusion

課題 (i) の現状分析と研究の位置づけ

(i) 長く複雑なSCの透明化

- ✓ Francisco and Swanson^[2]: **ブロックチェーン技術の適用コンセプト**
文献レビューを通して、ブロックチェーン技術がSCへ与える影響を明示、企業がブロックチェーン技術を採用するまでの概念モデルを提案。
- ✓ Chod et al.^[3]: **研究レベルでのブロックチェーンの適用方法提案**
ブロックチェーン技術を用いて製品の動きを透明化するために、大規模かつ高負荷の通信にも耐えうるソフトウェアプロトコルを開発。
- ✓ EcoVadis^[4]: **SCの透明化をサービスとして提供する企業**
- ✓ Carbon Disclosure Project^[5]: **グローバルな情報開示システムを運営するNGO**

- ブロックチェーン技術など、SC透明化に向けた学術的な研究は現在進行中
- 環境情報に偏るものの、SCの透明化サービスを提供する組織も存在

本研究では、課題 (i) が解決された後に発生する他の課題に注目

課題(ii)(iii)の現状分析と研究の位置づけ

(ii) 効率的な協調の決定方法

(iii) 公平性の担保

① 数理最適化モデルによる協調 例：Seifbarghy and Hemmati^[6]

特定の状況を対象とした静的なモデルが多く、**状況が合致すればそのまま実務へ応用可能**
状況や協調の内容が限定されるため、**汎用性が低く、動的に変化する対象に弱い**

② 自律分散モデルの協調・交渉 例：Amirkhani and Barshooi^[7]

複数の主体が相互作用する多くの状況に適用でき、**汎用性が高く、動的な変化にも対応可能**
多様な状況に適用できるからこそ、**決定すべき変数が多く、実務へ親和させづらい**

本研究の特徴

□ SCを構成する各企業は、自律分散する主体として反応し、行動する

→ SCのモデルは②自律分散型モデル（シミュレーション）を採用

□ 各企業の選好を踏まえて、数理最適化により企業間を協調させる

→ 協調方法は①数理最適化を採用

①と②のメリットを組み合わせたモデルの構築を試みる

つまり、本研究の位置づけは...

協調に関わる従来研究：2つに分かれて進化し続けてきた

数理最適化

自律分散モデル
(シミュレーション)

本研究：双方の要素を組み合わせ、よりよい協調のモデルを構築する

最適化結果を
シミュレーション
モデルに反映

数理最適化による
解釈性の高い協調方法

シミュレーションを用いて
動的に変化する複雑な状況を再現

状況が変化する度に
最適化モデルへ
情報を送信

動的な変化にも対応可能な数理最適化モデルによる協調を目指す

本研究の目的

本研究の目的

課題(ii) (iii)に対する**解決手段の一例**を提案すると共に、
課題(i)～(iii)を解決することで**得られるメリット**を示す

それにより → SC全体を通じた企業間協調システムの構築に貢献することを目指す

課題への対応

- (i) 長く複雑なSCの可視化
- (ii) 効率的な協調の決定方法
- (iii) 公平性の担保

シミュレーションで可視化されたSCを再現

数理最適化手法を用いた効率的な協調を実施

線形物理計画法を用いて公平性を担保

つまり、本研究は. . .

動的に変化し続けるSCを再現した**シミュレーション**

+

効率的かつ公平な協調を再現する**数理最適化手法**

||

効率的かつ公平な企業間協調システムを提案し、その有効性を検証する研究！

①企業間協調システムの提案

- ✓ 変化の激しい複雑なSCをシミュレーションによりモデル化
- ✓ 企業間を協調させる数理最適化モデルを設計
- ✓ シミュレーションモデルと最適化モデルを連結

②有効性の検証

- ✓ 協調システムを使用するシナリオとしないシナリオを設定
- ✓ 2つのシナリオで数値実験を実施し、結果を比較
- ✓ 考察を通じて、協調システムの有効性や欠点などを分析

01 背景
Introduction

02 研究の位置づけと目的
Research Positioning

03 提案手法：シミュレーションモデル
Simulation Model

04 提案手法：最適化モデル
Optimization Model

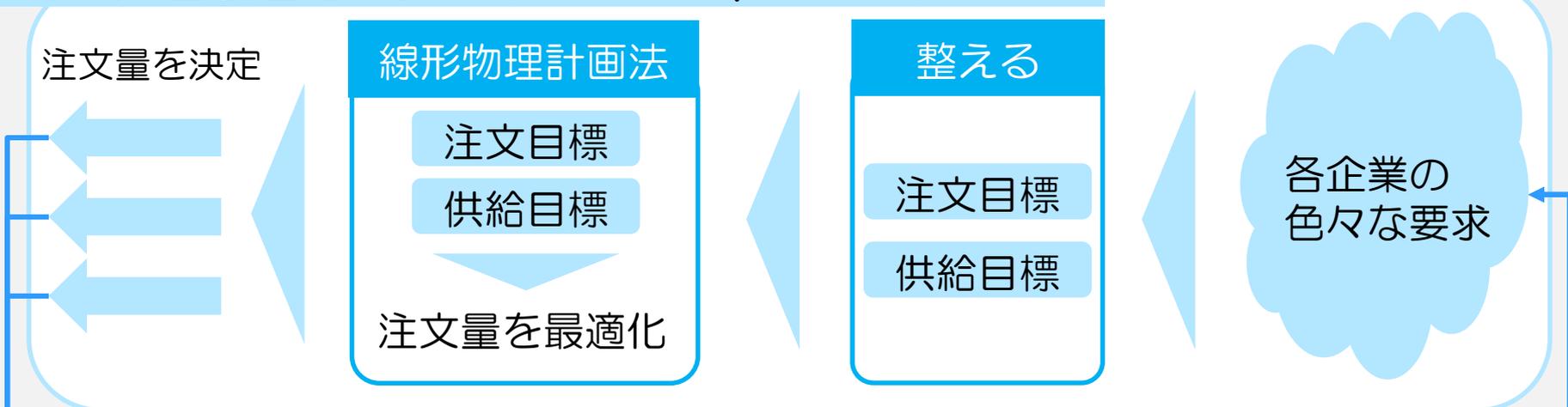
05 有効性の検証
Result & Discussion

06 結論
Conclusion

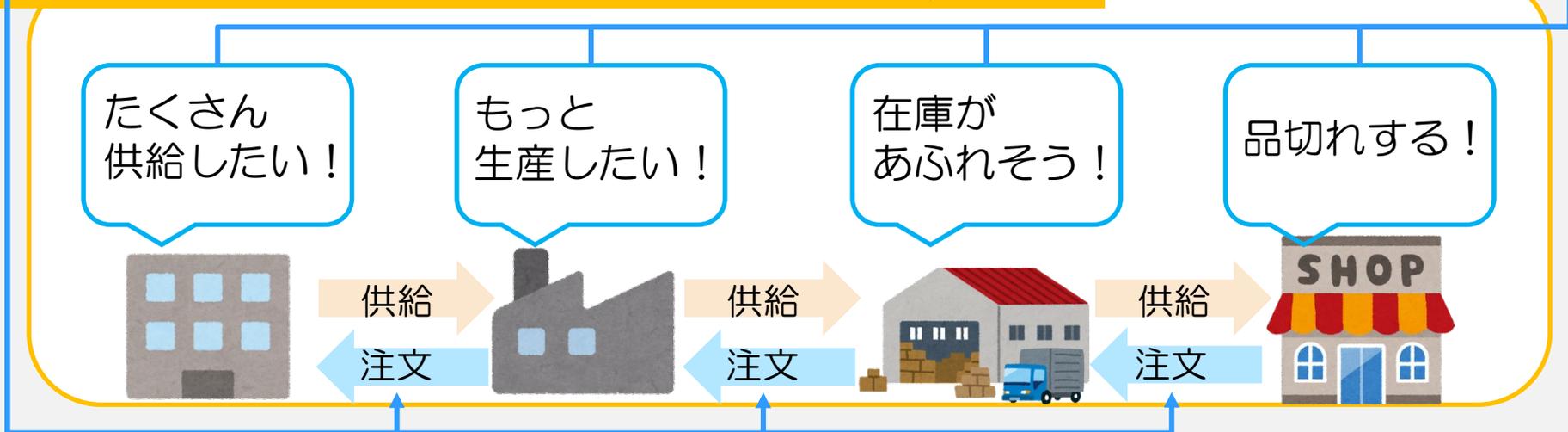
提案する協調システムの簡易的な全体像

12

数理最適化モデル (Gurobi Optimizer) [8]



シミュレーションモデル(S4 Simulation System)



①企業間協調システムの提案

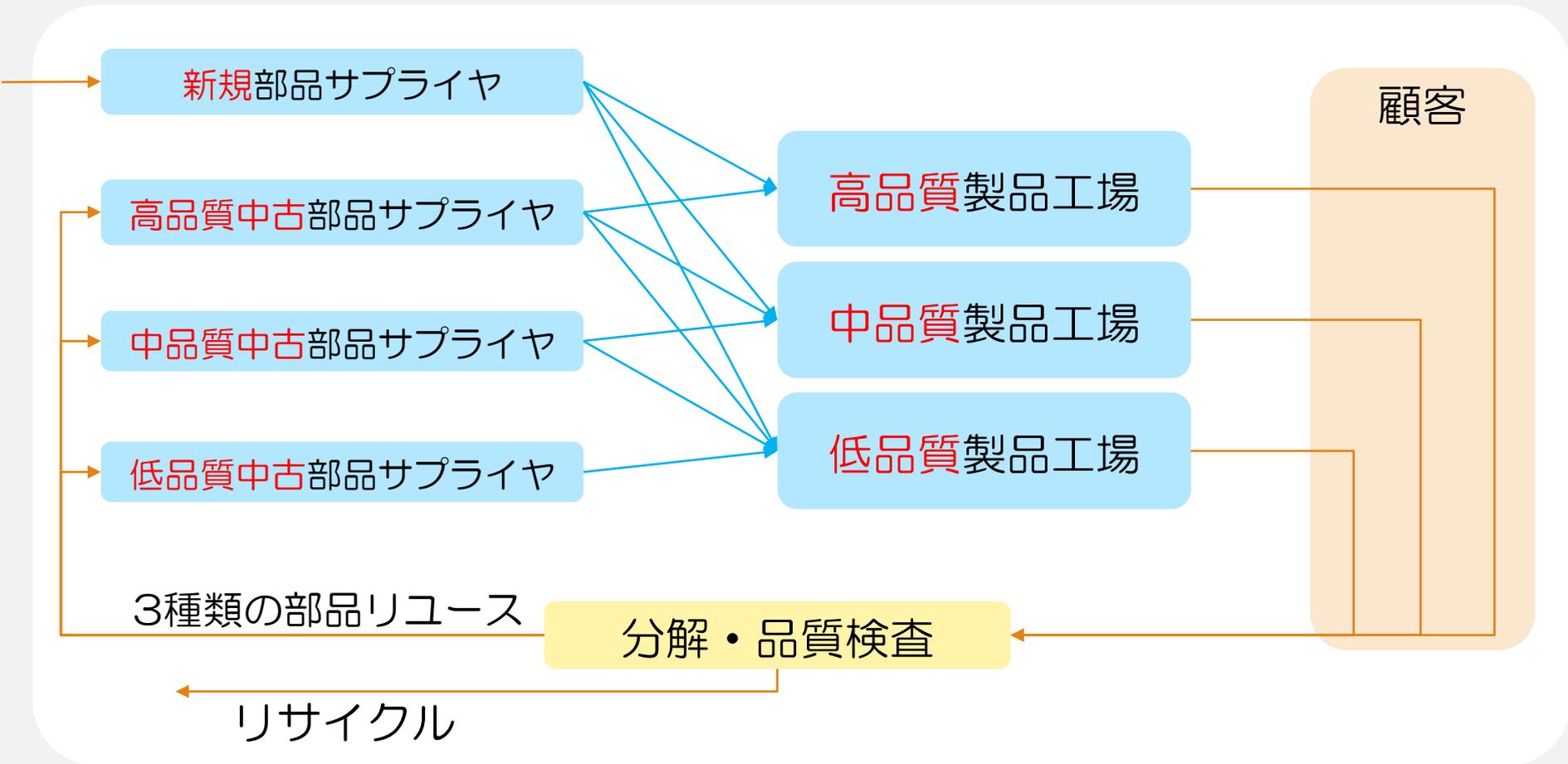
- ✓ 変化の激しい複雑なSCをシミュレーションによりモデル化
- ✓ 企業間を協調させる数理最適化モデルを設計
- ✓ シミュレーションモデルと最適化モデルを連結

②有効性の検証

- ✓ 協調システムを使用するシナリオとしないシナリオを設定
- ✓ 2つのシナリオで数値実験を実施し、結果を比較
- ✓ 考察を通じて、協調システムの有効性や欠点などを分析

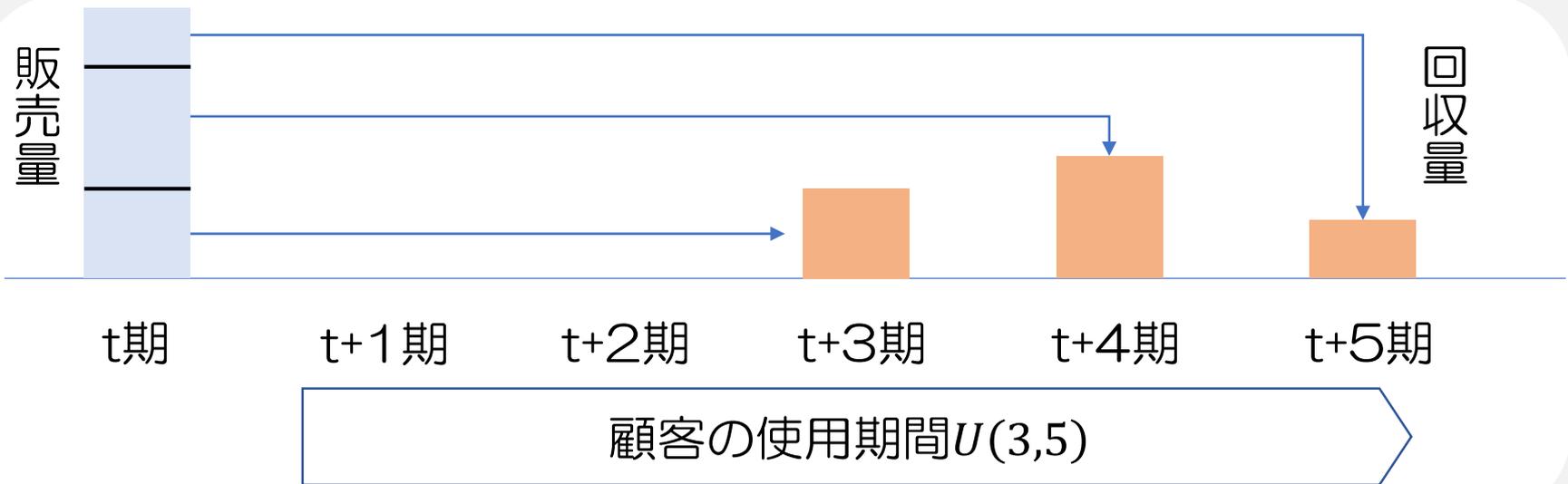
シミュレーションモデルの概念図

14



- ✓ 複雑なSCの代表例として、複数の用途を想定した循環型SCをモデル化
- ✓ 部品サプライヤと製品工場間の注文を通じて、企業間の協調を試みる

使用済み製品の回収量は過去の販売量と顧客の使用期間に影響を受ける



- 販売された製品は使用期間が経過した後、回収され、部品に分解される
- 本研究における製品の使用期間は、全て3~5の一様分布と設定する
→ t 期に販売された製品は、 $t+3$ 期~ $t+5$ 期の間回収される

シミュレーションモデルの特徴②

16

部品は使用によって劣化し、品質が下がり区別される

新規部品



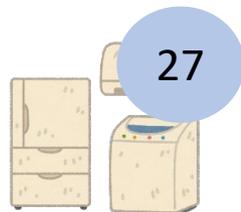
使用期間
 $U(3,5)$



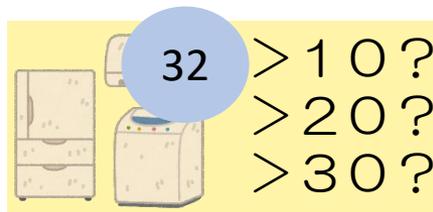
分解・品質検査

高品質
中古部品

低品質
中古部品



使用期間
 $U(3,5)$



分解・品質検査

リサイクル

- 製品には劣化度が存在し、使用期間に応じて単調に増加する
- 使用後の品質検査では、劣化度に応じて品質を分け、回収先を決める
→ 本研究において、劣化度が10増加するごとに品質を落とし、30を超えたらリサイクルする

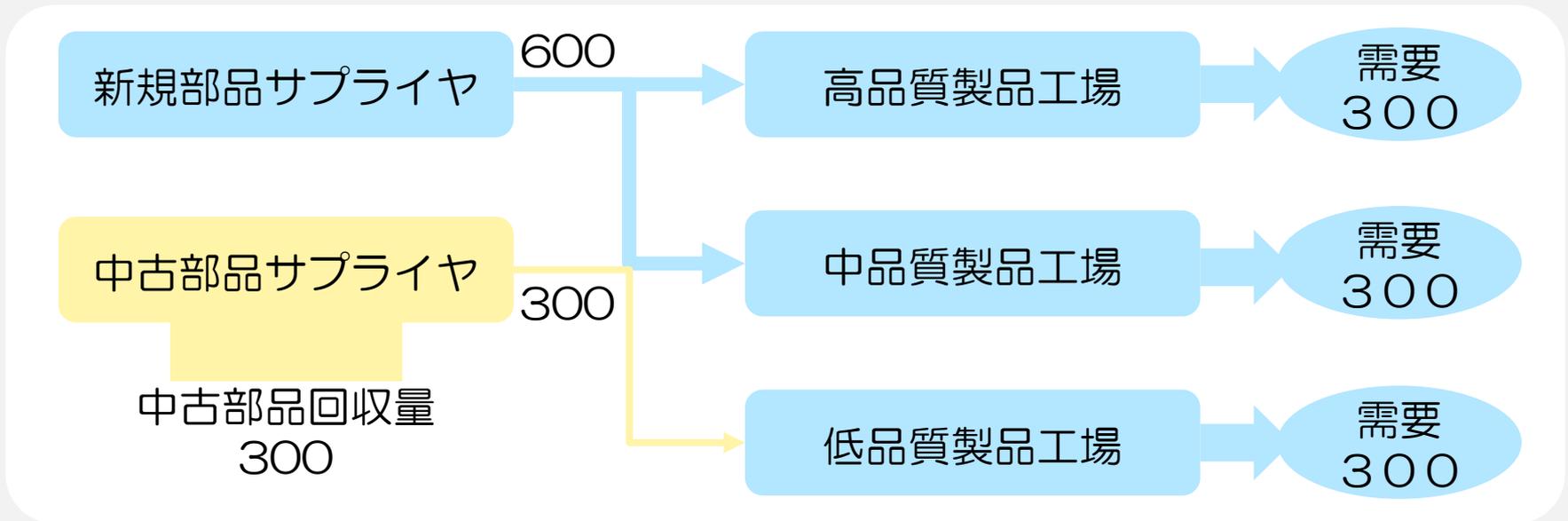
シミュレーションモデルの特徴③

17

部品の使用先は、品質によって限定される



- 新規部品、高品質部品はすべての製品に使用できるが
中品質部品、低品質部品は使用先が限定される



仮定 1 : 各製品の需要は完全に独立している

仮定 2 : 新規部品サプライヤは十分な安全在庫を持ち、基本的に品切れは発生しない

仮定 3 : 製品を1つ作るために、部品が1つ必要

仮定 4 : 需要は期ごとに300発生する

部品サプライヤは供給したい量を、製品工場は注文したい量を決定する

- ✓ 次期の入荷（予測）量
- ✓ 現在の在庫量

このくらい供給したい！
（供給目標）

部品サプライヤ

- ✓ 次期の需要予測量
- ✓ 次期の入荷（予測）量
- ✓ 現在の在庫量

このくらい注文したい！
（注文目標）

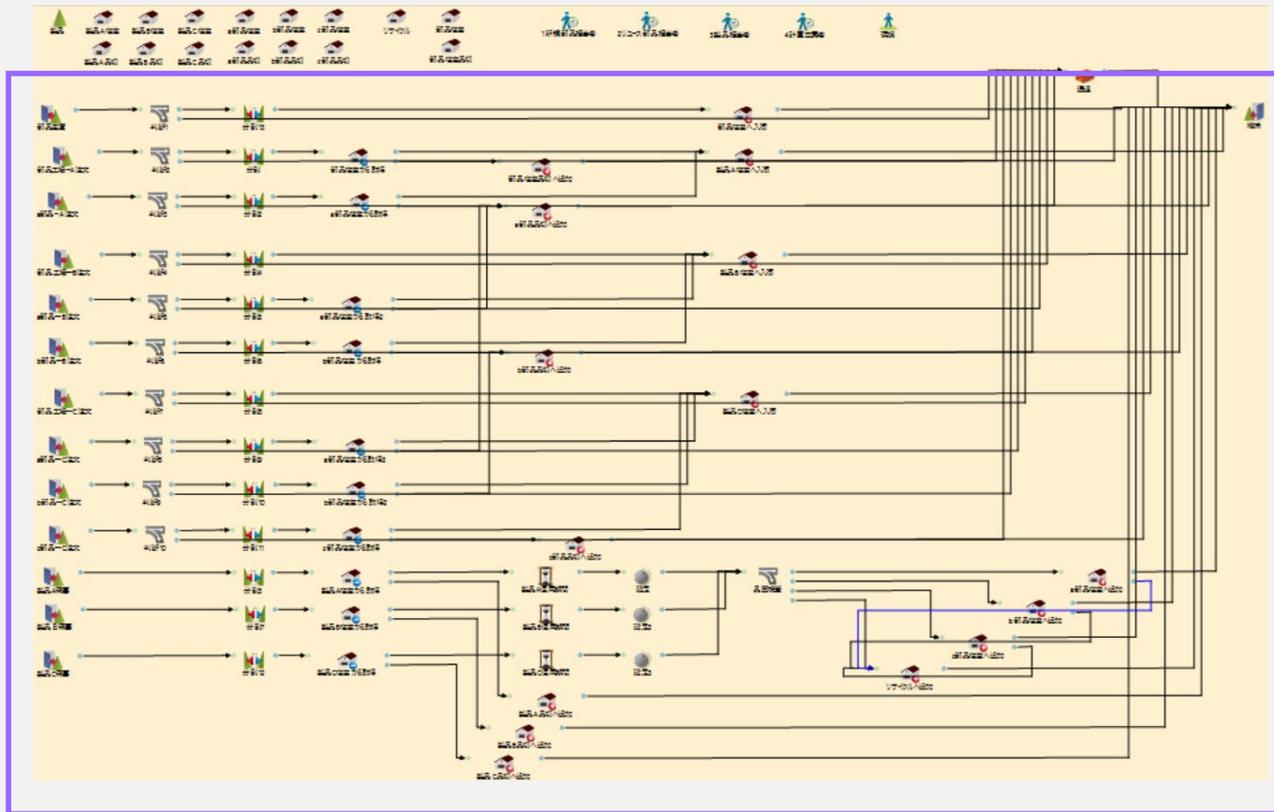
製品工場

数理最適化モデルへ

- 自身の状況（在庫量や需要予測量など）を踏まえて、部品サプライヤと製品工場は供給目標と注文目標を決定する
- 決定された供給選好と注文選好は数理最適化モデルへ送られ、最終的な注文量の決定に活用される

実装ポイント

- シミュレーション上を流れるアイテムを部品として捉え、モデルを設計
- アイテムに「劣化度」という属性を付与し、使用期間に応じて増加させる
- シミュレーションを用いることで、SCの状況が動的に変化していく様子を再現できる！



SCの
シミュレーション
モデル部分

数理最適化モデルとの連携方法

21

連携ポイント

- **S4の機能であるPython環境拡張**より、最適化用のパッケージを入れる（本研究ではGurobi Optimizerを使うため、gurobipyを使用）
- **同期エージェント**を用いることで、期ごとに状況を最適化ツールへ送り、解を受け取ってシミュレーションに反映する

同期エージェント

Python環境

Python環境拡張

gurobipy

追加pipオプション

```
--trusted-host pypi.python.org --trusted-host files.pythonhosted.org --trusted-host pypi.org
```

Wheelを追加

requirements.txtを作成

requirements.txtに従い更新

Pythonシェル起動(拡張環境)

fonttools	4.33.3	4.33.3	更新	削除
geojson	2.5.0	2.5.0	更新	削除
greenlet	2.0.2	2.0.2	更新	削除
gurobipy	nan	11.0.0	更新	削除
idna	2.10	2.10	更新	削除
itsdangerous	2.1.2	2.1.2	更新	削除
jedi	0.18.1	0.18.1	更新	削除
urllib3	1.26.14			
virtualenv	20.14.1			
Werkzeug	2.2.2			
wheel	0.38.4			
wxPython	4.1.2a1.dev5310+af8cca51			

OK

01 背景
Introduction

02 研究の位置づけと目的
Research Positioning

03 提案手法：シミュレーションモデル
Simulation Model

04 提案手法：最適化モデル
Optimization Model

05 有効性の検証
Result & Discussion

06 結論
Conclusion

①企業間協調システムの提案

- ✓ 変化の激しい複雑なSCをシミュレーションによりモデル化
- ✓ 企業間を協調させる数理最適化モデルを設計
- ✓ シミュレーションモデルと最適化モデルを連結

②有効性の検証

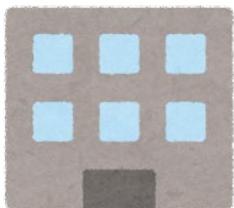
- ✓ 協調システムを使用するシナリオとしないシナリオを設定
- ✓ 2つのシナリオで数値実験を実施し、結果を比較
- ✓ 考察を通じて、協調システムの有効性や欠点などを分析

何を最適化していくのか？

24

シミュレーションモデルから受け取る情報

A個供給したい！



各種部品サプライヤ

B個注文したい！



各種製品工場

最終的な注文量を決定変数 X とすると...

部品サプライヤの満足度

$|X - A|$ が小さいほど高い

製品工場の満足度

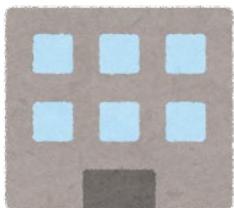
$|X - B|$ が小さいほど高い



AとBからの差分を最小化する注文量 X を導出したい！

シミュレーションモデルから受け取る情報

A個供給したい!



各種部品サプライヤ

B個注文したい!



各種製品工場

多目的線形計画問題

$$\text{Min. } |X - A|$$

$$\text{Min. } |X - B|$$

このままでは
解けないので...

加重平均法を用いて
単目的化する

$$\text{Min. } w_1 |X - A| + w_2 |X - B|$$

加重平均法の大きな課題
重みをどうやって決める?

シミュレーションモデルから受け取る情報

A個供給したい！
||
供給できる限界がA個です!!



各種部品サプライヤ

B個注文したい！
||
B個くらいがちょうどいいなあ



各種製品工場

同じ要求でも、
状況は全く違う

$$\text{Min. } w_1 |X - A| + w_2 |X - B|$$

$$w_1 : w_2 = 0.5 : 0.5 ?$$

$$w_1 : w_2 = 0.7 : 0.3 ?$$

適切な重みは
状況によって変化してしまう

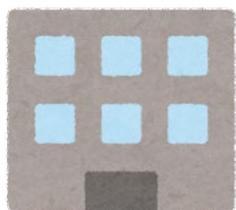
公平性を担保するために...

線形物理計画法^[9]

を用いて多目的問題を解く

シミュレーションモデルから受け取る情報

A_1 個供給できたら最高！
 A_2 個供給ならまあ満足
 A_3 個供給が最低ライン



各種部品サプライヤ

B_1 個注文できたら最高！
 B_2 個注文ならまあ満足
 B_3 個供給が最低ライン



各種製品工場

複数の目標値を
設定する

$$\text{Min. } w_{11}|X - A_1| + w_{12}|X - A_2| + w_{13}|X - A_3| \\ + w_{21}|X - B_1| + w_{22}|X - B_2| + w_{23}|X - B_3|$$

- ✓ こんなにたくさんの重みを適切に決められるの？
- ✓ この解き方でどうして公平性を担保できるの？

線形物理計画法の特徴

$$\text{Min. } w_{11}|X - A_1| + w_{12}|X - A_2| + w_{13}|X - A_3| \\ + w_{21}|X - B_1| + w_{22}|X - B_2| + w_{23}|X - B_3|$$

✓ こんなにたくさんの重みを適切に決められるの？

線形物理計画法は、**重みを決めるアルゴリズム**が備わっている

重みづけアルゴリズムの特徴

$$w_{11} \ll w_{12} \ll w_{13}$$

$$w_{21} \ll w_{22} \ll w_{23}$$

満足度の**低い**目標値ほど、
重みを重くする

✓ この解き方でどうして公平性を担保できるの？

重みづけの結果、**達成される最悪の目標値が最高になる**解を導出する

例えば、線形物理計画法を用いて10個の企業が協調する場合...

9個の企業が**最高**で、1個の企業が**最低ライン**の注文量

導出される解はこっち → **10個の企業がまあ満足できる注文量**

シミュレーションモデルから受け取る情報

最高！ : = [在庫量]
 : > [在庫量] × 0.8
 : > [在庫量] × 0.6
 : > [在庫量] × 0.4
 : > [在庫量] × 0.2
無理！ : < [在庫量] × 0.2,
 : > [在庫量]

各種部品サプライヤ

最高！ : = [需要量] - [在庫量]
 : < [需要量] - [在庫量] + 20
 : < [需要量] - [在庫量] + 40
 : < [需要量] - [在庫量] + 60
 : < [需要量] - [在庫量] + 80
無理！ : > [需要量] - [在庫量] + 100,
 : < [需要量] - [在庫量]

各種製品工場

- ✓ 部品サプライヤと製品工場は、それぞれ6段階の目標範囲を設定
- ✓ 部品サプライヤは、自身の在庫量を踏まえて供給目標を設定
- ✓ 製品工場は、次期の需要量と自身の在庫量を踏まえて注文目標を設定

本研究では上記のような簡易的な目標設定の下で実験を進める

将来的には...

実務へ応用する場合、この部分に現場の判断が反映される

01 背景
Introduction

02 研究の位置づけと目的
Research Positioning

03 提案手法：シミュレーションモデル
Simulation Model

04 提案手法：最適化モデル
Optimization Model

05 有効性の検証
Result & Discussion

06 結論
Conclusion

①企業間協調システムの提案

- ✓ 変化の激しい複雑なSCをシミュレーションによりモデル化
- ✓ 企業間を協調させる数理最適化モデルを設計
- ✓ シミュレーションモデルと最適化モデルを連結

②有効性の検証

- ✓ 協調システムを使用するシナリオとしないシナリオを設定
- ✓ 2つのシナリオで数値実験を実施し、結果を比較
- ✓ 考察を通じて、協調システムの有効性や欠点などを分析

資源循環優先シナリオ

- ✓ 全ての製品工場は中古部品を優先的に注文する
- ✓ 中古部品で需要を満たせない場合、不足分だけ新規部品を注文する

各企業が協調せず、独立して社会的な要求へ応えようとするシナリオ

企業間協調シナリオ

- ✓ 全ての製品工場・部品サプライヤは注文の目標値と供給の目標値を表明
- ✓ 最適化モデルが注文量を調整しシミュレーション上で注文を実行

シミュレーションが1期進行する度に繰り返す

各企業が協調しながら社会的な要求へ応えようとするシナリオ

公平性：新規部品サプライヤの注文量の標準偏差

- ✓ 資源循環に伴う負荷は、最終的に上流のサプライヤへ押し付けられていく
- ✓ 新規部品サプライヤの注文が安定しているほど、公平性が高い

環境性：中古部品の総供給量

- ✓ 循環型SCが対象 → 資源循環量は多ければ多いほど良い
- ✓ 本モデルで循環させる中古部品の供給量が多いほど、環境性が高い

経済性：製品工場・部品サプライヤを合わせた平均在庫量

- ✓ 滞留しているモノが少ないほど、効率的なSCといえる
- ✓ 製品工場・部品サプライヤすべての在庫量が少ないほど、経済性が良い

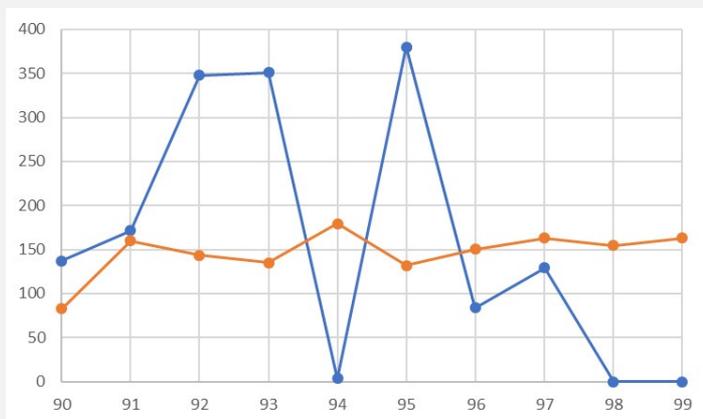
100期のシミュレーション結果

	資源循環優先シナリオ	企業間協調シナリオ
公平性 (小さいほど良い)	171 45%改善	127
環境性 (大きいほど良い)	69567	68696
経済性 (小さいほど良い)	1393 15%悪化	1606

企業間で協調を行うと...

- ✓ 公平性は大きく改善！
- ✓ 環境性はほぼ変わらず
- ✓ 経済性は悪化...

	資源循環優先シナリオ	企業間協調シナリオ
公平性 (小さいほど良い)	171	127



90~99期のシナリオ別
新規部品サプライヤ注文量
青：資源循環優先シナリオ
赤：企業間協調シナリオ

- ✓ 循環型SCはとてつもなく大きな変動が発生
⇒ 対処が必須！
- ✓ 資源循環優先シナリオでは、中古部品の回収量変動がそのまま新規部品サプライヤへ
⇒ 大きな変動がSC上流へ伝播してしまう

実験レベルの単純な協調であっても
ある程度変動を抑えられることを確認

協調により、上流に押し付けられていた負担をある程度解消できる！

	資源循環優先シナリオ	企業間協調シナリオ
環境性 (大きいほど良い)	69567	68696

- ✓ 資源循環優先：回収された中古部品はすぐに製品へ組み込まれる
利点 ⇒ 回収量が中古部品の注文量となるため、環境性は最も高くなる
欠点 ⇒ 考察①のとおり、大きな注文変動につながってしまう
- ✓ 企業間協調：他サプライヤの在庫状況に応じて、注文量が調整される
考察①のとおり、注文変動が少ないにもかかわらず、環境性がほぼ変わらない
⇒ 協調システムがうまく稼働し、無駄なく部品を供給できている！

企業間で協調することにより、注文変動を増やさずに資源循環が可能！

	資源循環優先シナリオ	企業間協調シナリオ
経済性 (小さいほど良い)	1393	1606

- ✓ 経済性の悪化 ⇒ 全体的に在庫が増加している
在庫が増え、滞留期間が増えるほど、企業の利益は圧迫される...
経済的なメリットがないならば、提案した協調システムは失敗？

論点Ⅰ：より上流のSCの経済性

考察①のとおり、より上流のSCに対する注文の変動が減少している

本研究では観測していない
上流のSCも含めた経済性は？

論点Ⅱ：間接的な経済性の向上

協調により、ある程度供給側の状況を考慮した注文が可能になった

生産計画等の効率化により発生
する間接的なメリットは？

企業間協調によるメリットは、より広い視点で分析する必要あり！

01 背景
Introduction

02 研究の位置づけと目的
Research Positioning

03 提案手法：シミュレーションモデル
Simulation Model

04 提案手法：最適化モデル
Optimization Model

05 有効性の検証
Result & Discussion

06 結論
Conclusion

本研究の目的

課題(ii) (iii)に対する**解決手段の一例**を提案すると共に、
課題(i)～(iii)を解決することで**得られるメリット**を示す

それにより → SC全体を通じた企業間協調システムの構築に貢献することを目指す

結果

- ✓ シミュレーションと数理最適化手法を組み合わせた企業間協調システムを提案
- ✓ 循環型SCを対象に数値実験を行い、公平性、環境性におけるメリットを確認
- ✓ 一方で、経済性の悪化も確認

今後の方針

- ✓ 大きなSCモデルを設計し、協調と上流のSCの経済性の関係を明らかにする
- ✓ 協調によって得られる間接的なメリットを考慮した評価指標を考案する
- ✓ 各企業の目標設定を、より現実的な手法(現場の判断基準)を用いて実施する

- [1] NTTグループサステナビリティ推進ガイドライン,第1版,2022年2月
www.ntt-f.co.jp/csr/env-prot/pdf/guidelines_sustainability_supply_chain.pdf(閲覧日:2022/11/30)
- [2] Francisco, K., Swanson, D., 2018. The Supply Chain Has No Clothes: Technology Adoption of Blockchain for Supply Chain Transparency. Logistics 2, 2. <https://doi.org/10.3390/logistics2010002>
- [3] Chod, J., Trichakis, N., Tsoukalas, G., Aspegren, H., Weber, M., 2020. On the Financing Benefits of Supply Chain Transparency and Blockchain Adoption. Manag. Sci. 66, 4378–4396.
<https://doi.org/10.1287/mnsc.2019.3434>
- [4] EcoVadis ホームページ,<https://ecovadis.com/ja/>(閲覧日:2022/11/30)
- [5] CDPJapan ホームページ, <https://japan.cdp.net/>(閲覧日:2022/11/30)
- [6] Seifbarghy, M., Hemmati, M., 2022. A Multi-Objective VMI Model for a Two-Echelon Single Manufacturer Multiple Buyers Supply Chain. Advances in Industrial Engineering. 56, 139–162,
<https://doi.org/10.22059/AIE.2022.339291.1826>
- [7] Amirkhani, A., Barshooi, A.H., 2022. Consensus in multi-agent systems: a review. Artif. Intell. Rev. 55, 3897–3935. <https://doi.org/10.1007/s10462-021-10097-x>
- [8] Gurobi optimization, <https://www.gurobi.com/>(閲覧日:2022/11/30)
- [9] Messac, A., Gupta, SM., Akbulut, B., 1996. Linear Physical Programming: A New Approach to Multiple Objective Optimization. Transactions on Operational Research. 8, 39–59