

持続可能な生産システムの安定性を考慮した 潜在在庫の管理方法に関する一考察

東京理科大学工学部経営工学科3年
瀬瀬潤大

(株)NTTデータ数理システム
2021年度 学生研究奨励賞

大量生産・大量消費・大量廃棄

大戦後の深刻なものの不足から脱却→物質的な豊かさを目指すものづくり

製品の安全性に対する懸念, 公害の発生, 環境問題への注目

適正生産・適正消費・適正廃棄

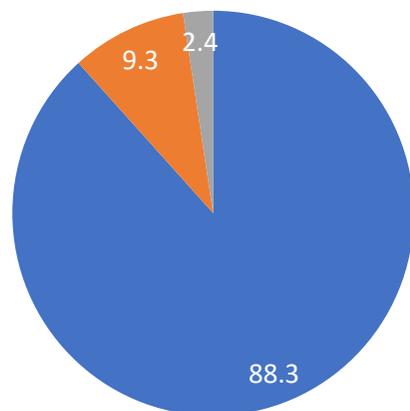
必要なものを, 必要な分だけ生産できる効率的なものづくり

世界的な需要の増加, 天然資源の枯渇, 環境問題の顕在化

持続可能な生産・消費・廃棄を目指して

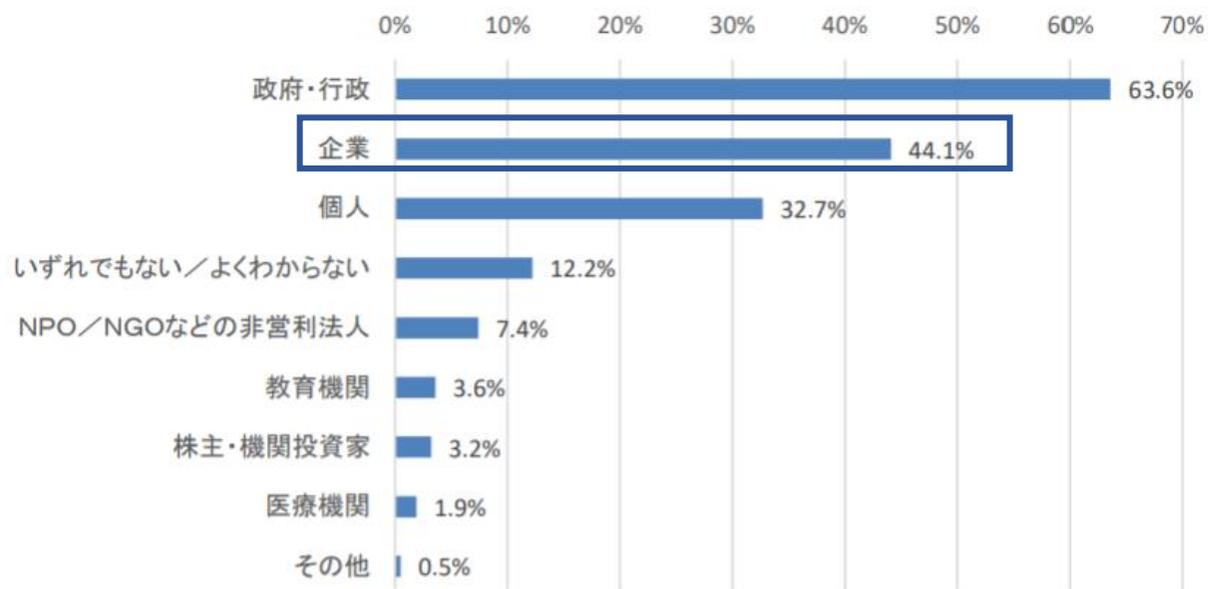
社会的課題の解決+経済的利益の創出=持続可能なものづくり

地球環境問題に対する関心[1]



- 関心がある (小計)
- 関心がない (小計)
- 無回答

社会的課題の解決に向けて行動すべき主体[2]

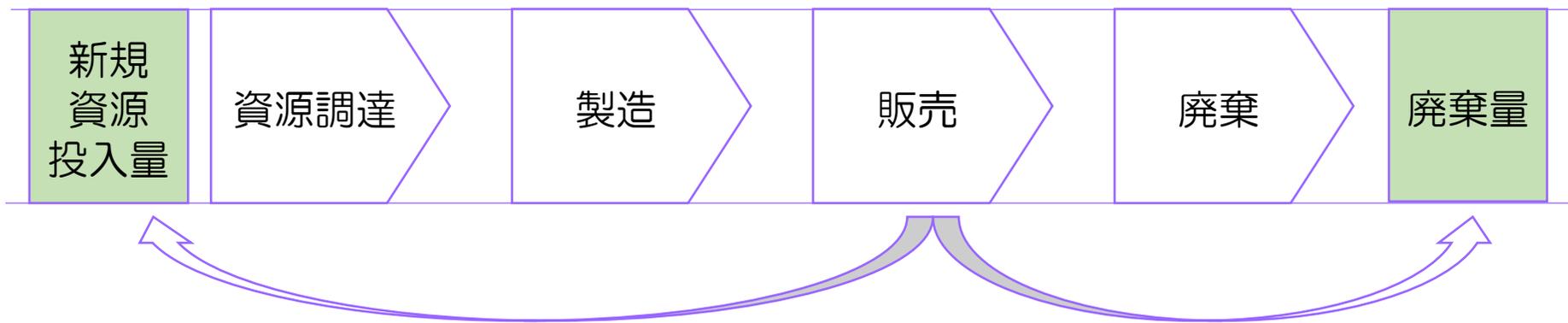


企業は社会的課題の解決を求められ、今後もその圧力は高まっていく

今後の国際的な競争で優位に立つためには……

「経済的利益の創出」と「社会的課題の解決」を両立した
持続可能なものづくりが必要！

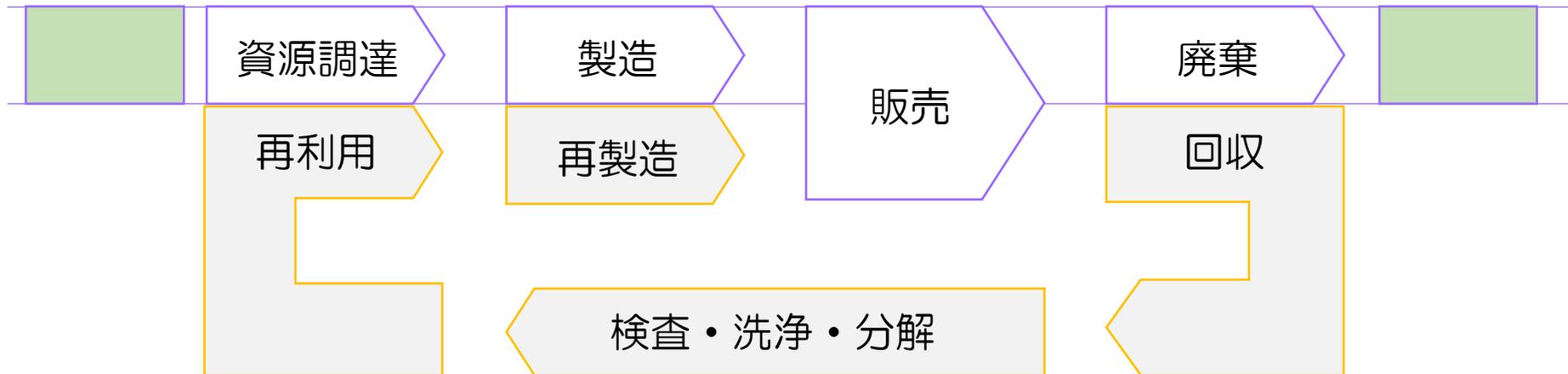
従来の生産システム



経済的利益の創出と社会的課題の解決が両立できない！

生産システムを見直す必要がある

循環型生産システム



経済的利益の創出と社会的課題の解決を両立！

しかし、循環型生産システムを導入した企業はほとんどない

循環型生産システムの実現には大きな課題が……

回収の不確実性

使用済み製品の回収は「質・量・タイミング」などの不確実性が伴う



本研究の注目課題

安定性の課題

- ① 回収量が不確実→再製造量が変動
- ② ①の変動によって、新規の製造量が変動
⇒資源の調達量や上流企業への発注量が変動

設備稼働率の低下
作業人数の調節などなど
現場の負担が増加！
+
サプライチェーン全体の問題発生

- ③ 需要に応じた販売が困難→品切れや過剰在庫が発生：費用の増加+利益の減少

システムを安定して運用するために、回収の不確実性を管理したい

- ✓ Minner(2001)[3]
循環型生産システムの管理に関する研究の流れを以下の2つに分類

SIC (Stochastic Inventory Control) 統計的在庫管理

在庫量に注目した管理方法

特徴

- ✓ 在庫量に応じて、生産や発注を決定する
- ✓ 安全在庫を定め、必要になったら前の工程へワークを発注する
- ✓ プル型の管理

課題

- ✓ 回収品在庫の前工程は市場→発注できない

MRP (Material Requirement Planning) 資材所要量計画

生産計画に注目した管理方法

特徴

- ✓ 需要予測に応じた生産計画を立案
- ✓ 在庫をできるだけ減らし、計画に沿って後の工程へワークを送る
- ✓ プッシュ型の管理

課題

- ✓ 回収量と生産計画の誤差修正

本研究では「統計的在庫管理」に注目

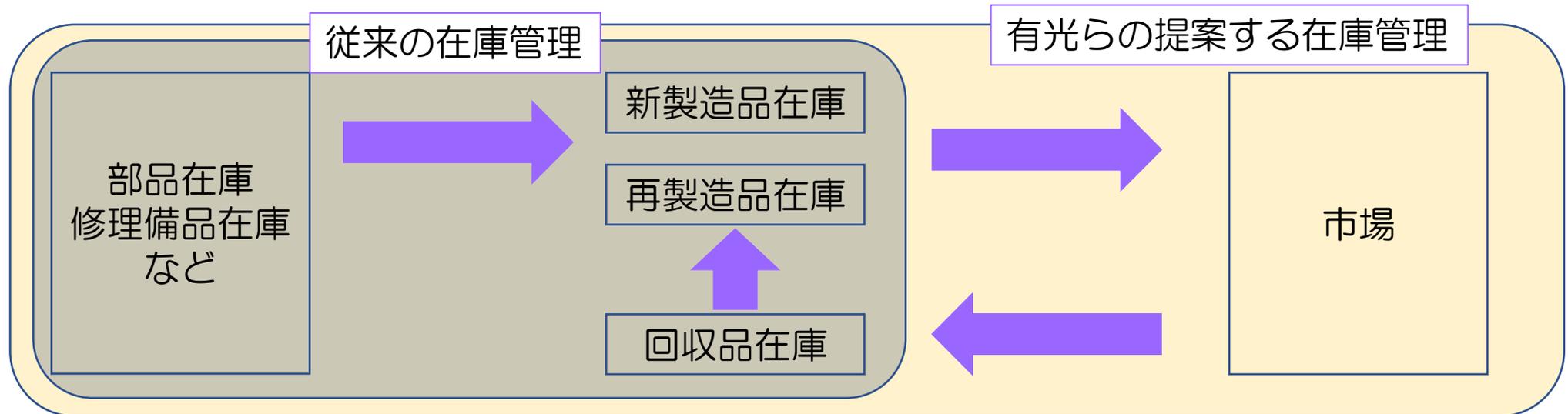
課題

回収品在庫の前工程は市場→在庫に応じた発注が不可能

再製造品の素材となる回収品は、必要になっても発注できず、必要なくとも発生する

✓ 有光ら(2003)(2004)[4][5]

- 従来型の在庫管理を拡張し、顧客が使用中の製品を在庫として考える潜在在庫の概念を導入
- 循環型生産システムの費用を最小化する生産条件を決定



先行研究ではシステムの安定性を考慮できていない！

目的

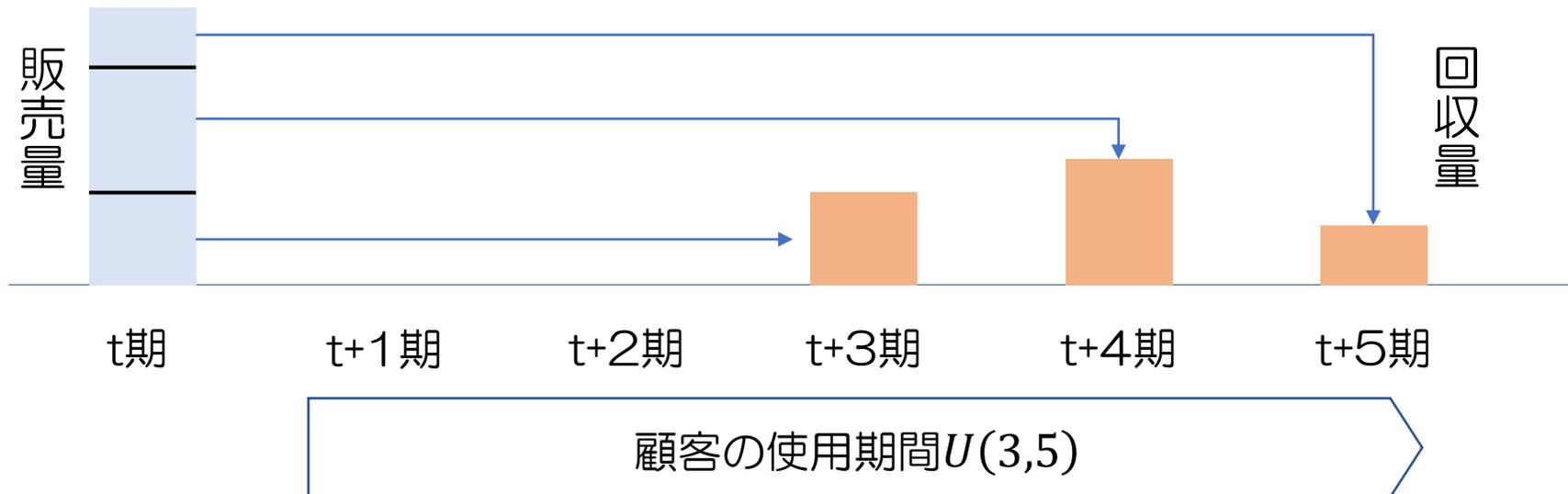
顧客が使用中の製品を潜在的な在庫とみなす循環型生産システムをモデル化し、潜在在庫の管理がシステムの安定性に与える影響を分析する

- 潜在在庫の管理は、再製造品の販売量を制限することで実施する
- 安定性の評価には、回収量と製造・再製造量の変動の大きさをを用いる

方法

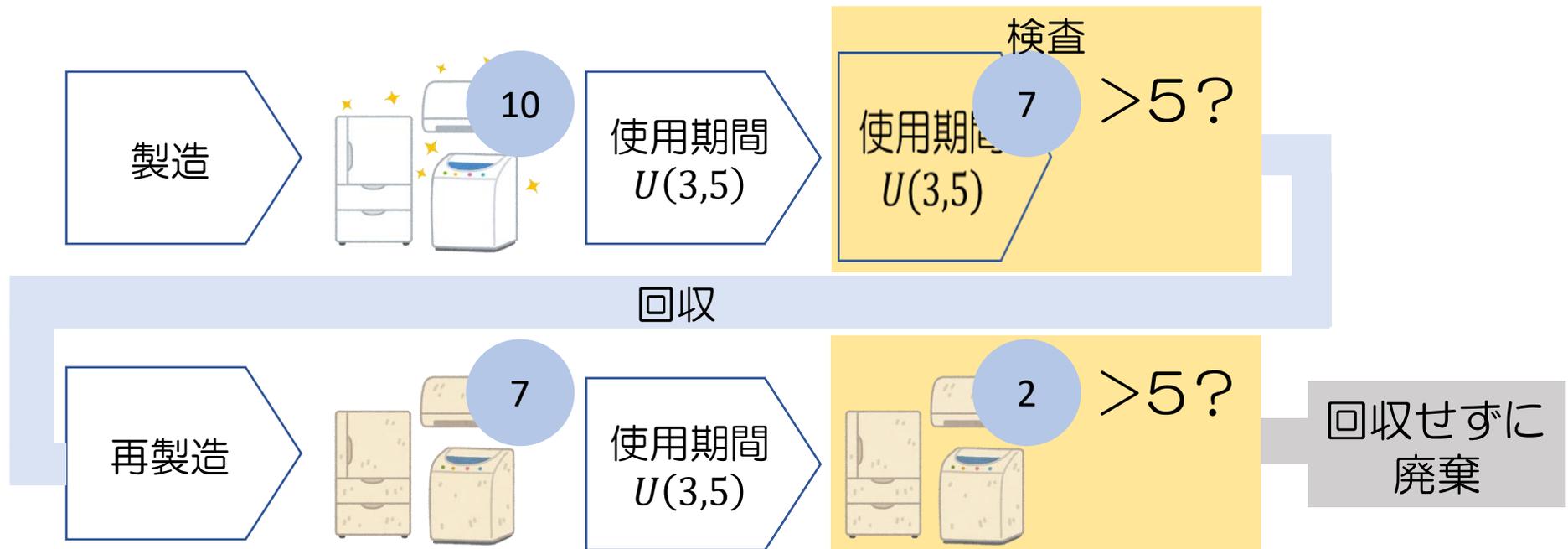
- ① 循環型生産システムをモデル化する
- ② モデルを「S4 simulation system」へ実装する
- ③ 再製造品の販売量でシナリオを設定し、数値実験を行う
- ④ 結果を考察する

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

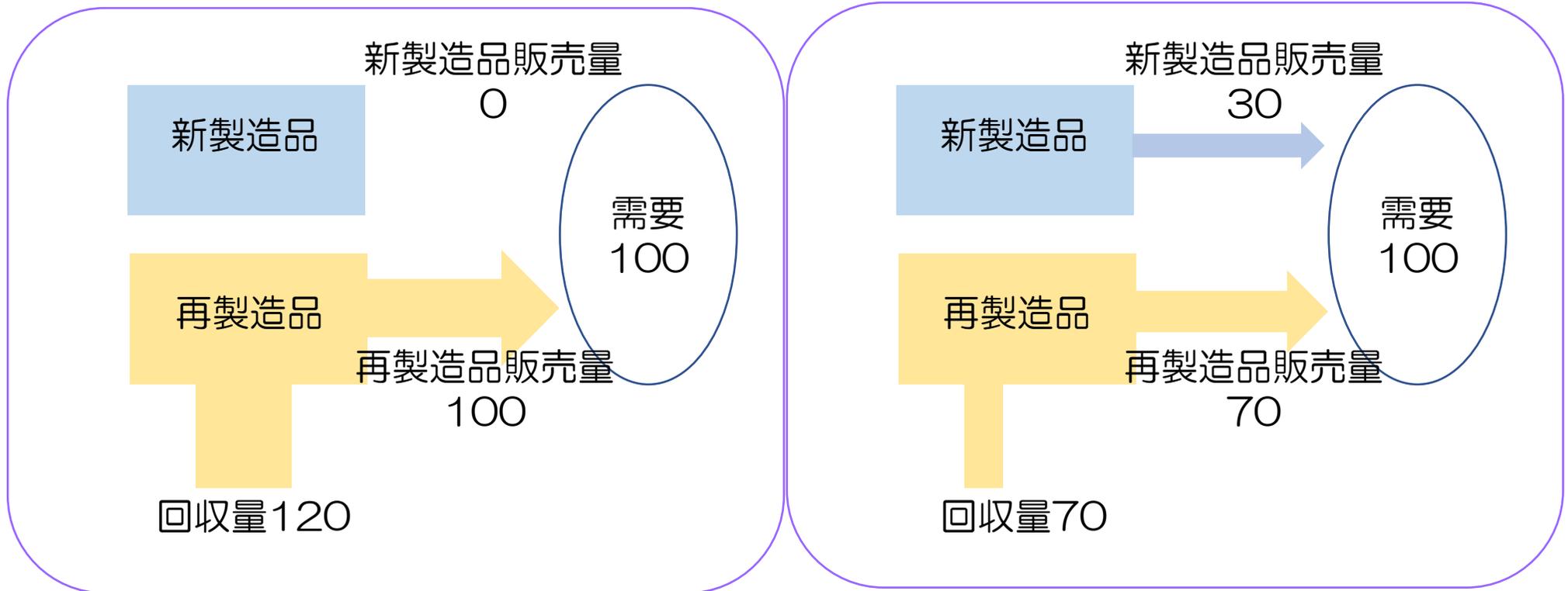


- 販売された製品は，使用期間が経過した後，回収される
- 本研究における使用期間は3～5の一様分布と設定する
→ t 期に販売された製品は， $t+3$ 期～ $t+5$ 期の間に回収される

製品は使用によって劣化し、最終的には回収する価値がなくなる



- ▶ 製品には寿命が存在し，使用期間に応じて単調に減少する
- ▶ 使用後の検査において寿命が十分に長い場合のみ回収する
→本研究においては，最大使用期間である5より大きければ回収する
- ▶ 本研究において，新製造品の寿命は10と設定する



仮定1：新製造品と再製造品の需要は完全に競合し
消費者は再製造品を優先して購入する

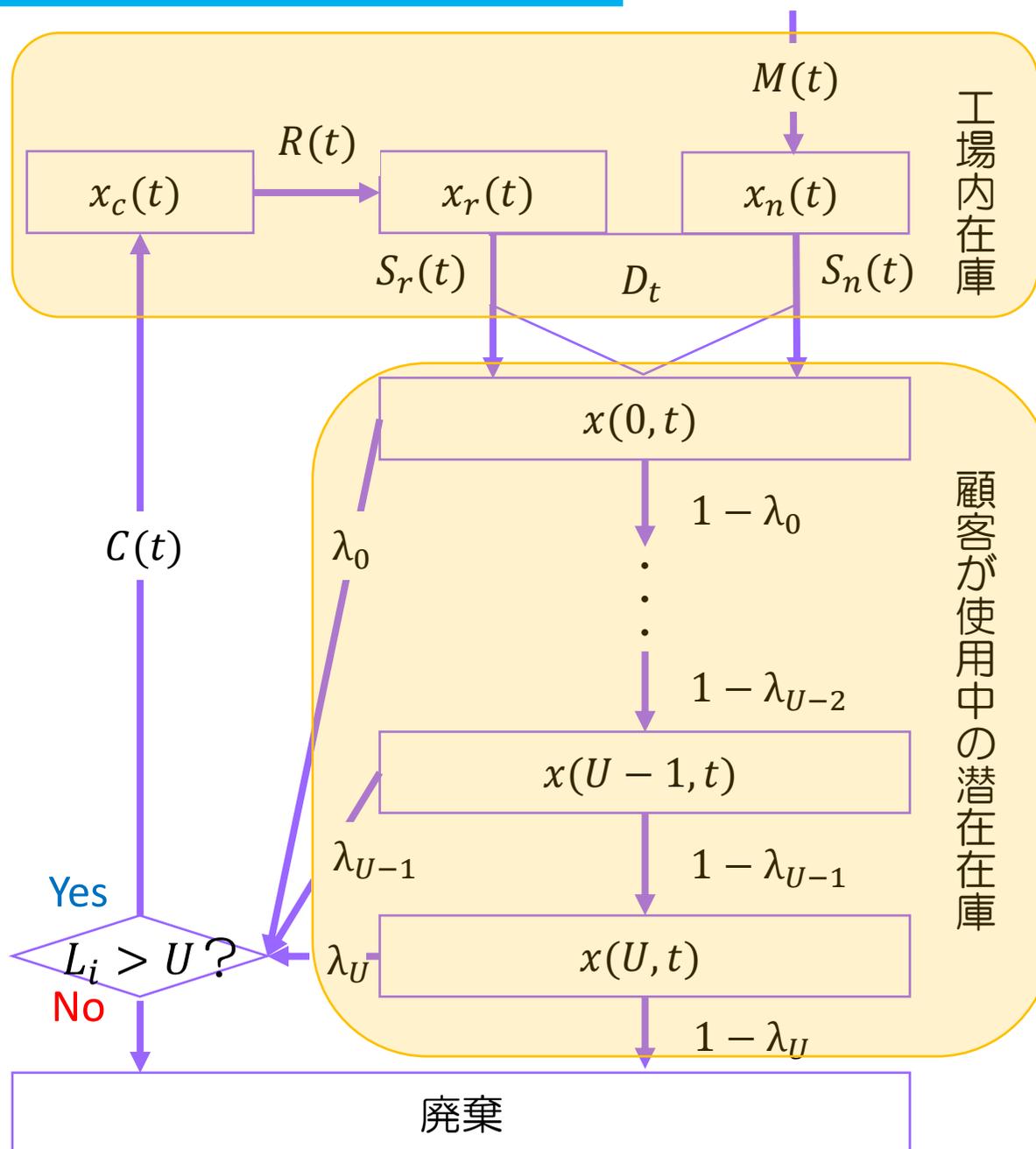
仮定2：新製造品は必要な量だけ瞬時に製造され、品切れは発生しない

仮定3：再製造品を1つ作るために、回収品が1つ必要

仮定4：需要は期ごとに100発生する

モデルの詳細

記号	説明
D_t	t 期の総需要量 (個)
U	顧客の最大使用期間 (期間)
$S_n(t)$	t 期の新製造品販売量 (個)
$S_r(t)$	t 期の再製造品販売量 (個)
$M(t)$	t 期の製造量 (個)
$R(t)$	t 期の再製造量 (個)
$C(t)$	t 期の回収量 (個)
$x_n(t)$	t 期の新製造品在庫 (個)
$x_r(t)$	t 期の再製造品在庫 (個)
$x_c(t)$	t 期の回収品在庫 (個)
$x(p, t)$	t 期において使用期間が p 期間である製品の潜在在庫 (個) ($p = 0, 1, 2, \dots, U$)
λ_p	使用期間が p 期間である製品の回収確率 ($0 \leq \lambda_p \leq 1$)
L_i	製品 i の残寿命 (期)
$Limit$	再製造品の販売量制約 (個)



モデルの定式化①

□ 新製造品販売量 $S_n(t)$

新製造品と再製造品の需要は完全に競合し、再製造品が優先して購入される

$$S_n(t) = D_t - S_r(t)$$

□ 再製造品販売量 $S_r(t)$

再製造品の販売量を $Limit$ に制限することで、潜在在庫を管理する

$$S_r(t) = \min(x_r(t - 1) + R(t), Limit)$$

□ 製造量 $M(t)$

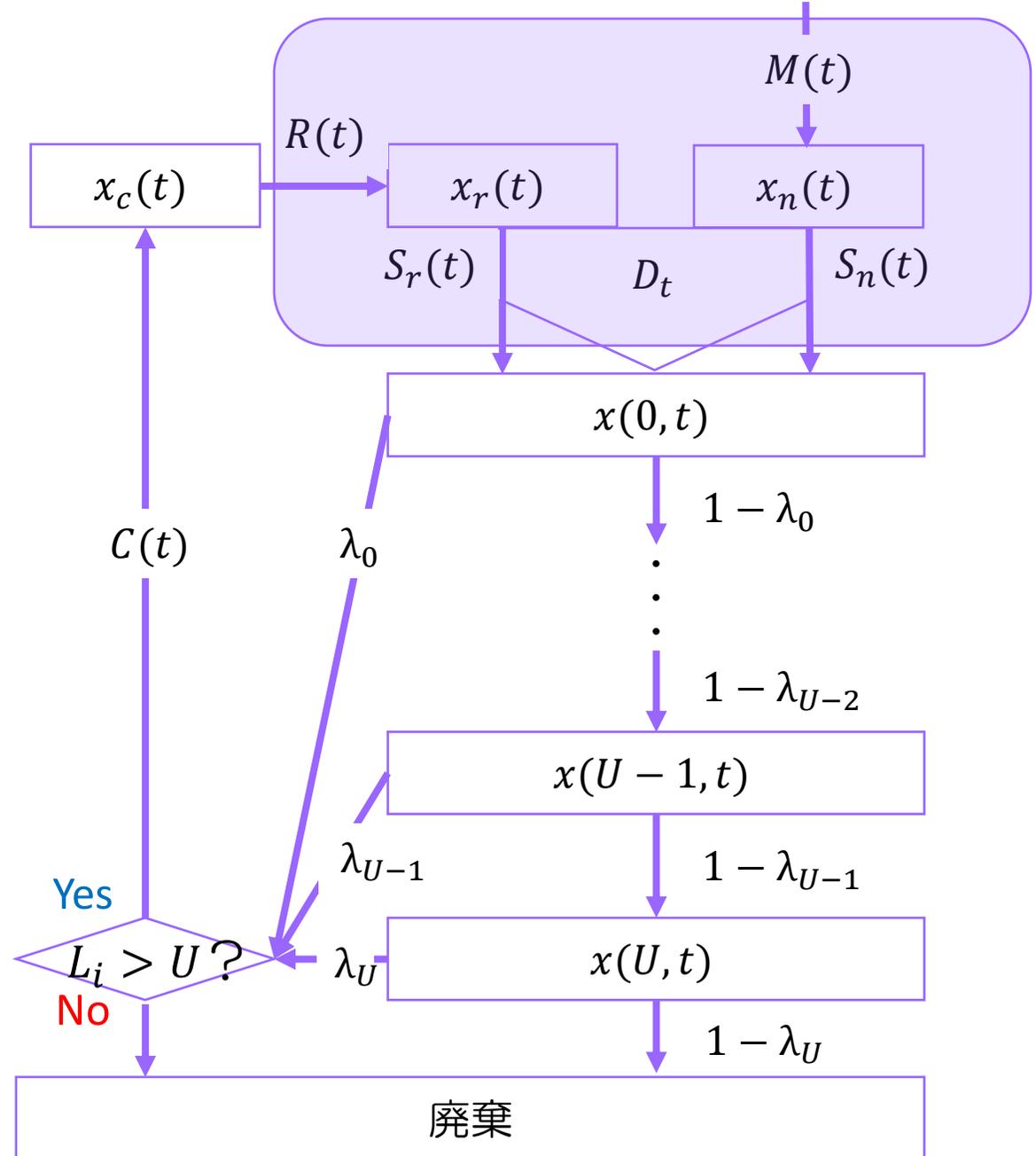
新製造品は必要な量だけ瞬時に製造され、品切れは発生しない

$$M(t) = S_r(t)$$

□ 再製造量 $R(t)$

再製造品を1つ作るために、回収品が1つ必要

$$R(t) = \min(x_c(t - 1) + C(t), Limit)$$



D_t : 総需要量, $Limit$: 再製造品の販売量制約, $C(t)$: 回収量
 x_c : 回収品在庫量, x_r : 再製造品在庫量, t : 期間

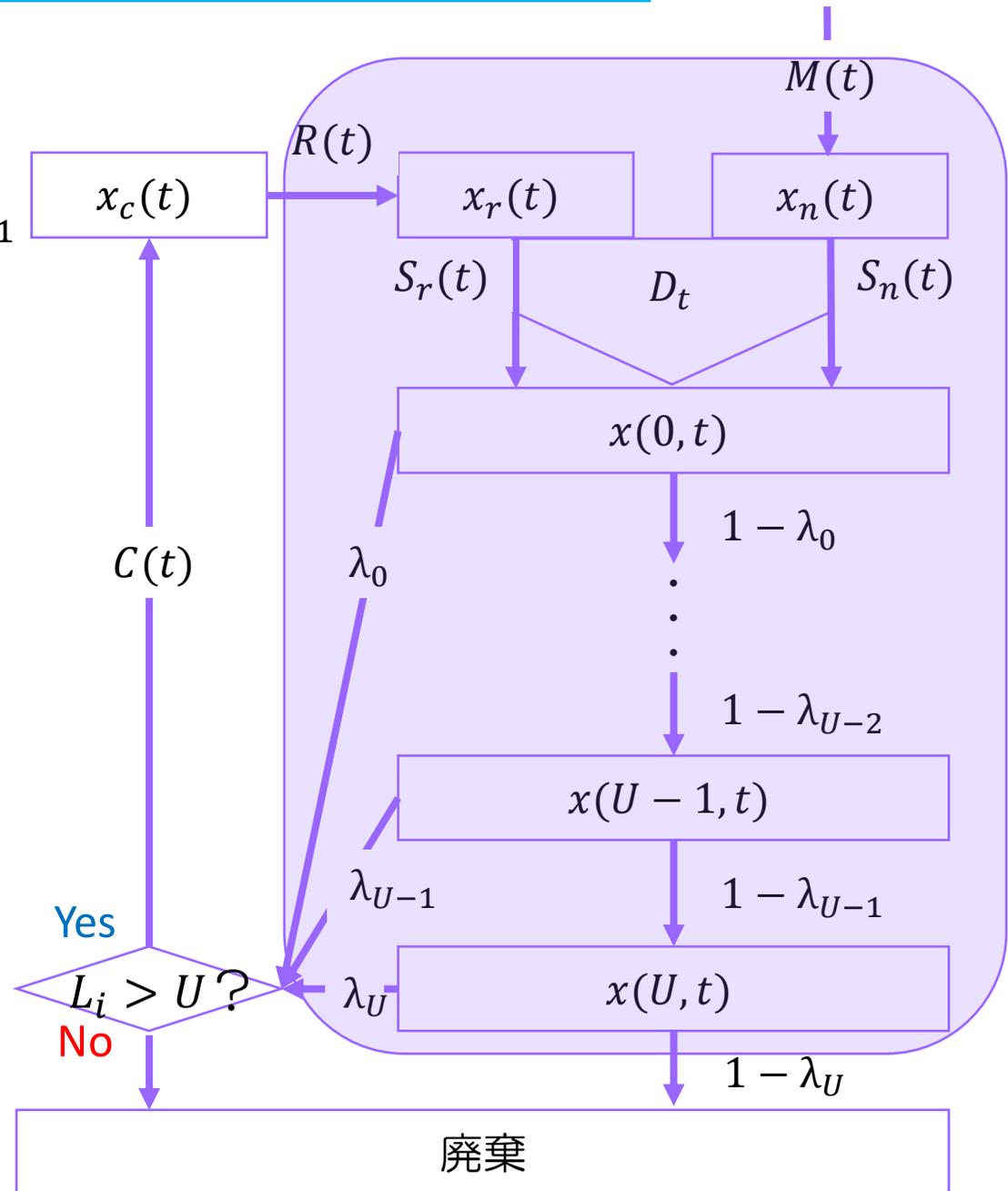
モデルの定式化②

- 潜在在庫量 $x(0, t)$
 $t - 1$ 期の販売量
 $x(0, t) = S_n(t - 1) + S_r(t - 1) = D_{t-1}$

- 潜在在庫量 $x(p, t)$ ($p \neq 0$)
 $x(p - 1, t - 1)$ のうち, 回収されない量
 $x(p, t) = x(p - 1, t - 1) \times (1 - \lambda_p)$

- 新製造品在庫量 $x_n(t)$
 $x_n(t) = x_n(t - 1) + M(t) - S_n(t)$

- 再製造品在庫量 $x_r(t)$
 $x_r(t) = x_r(t - 1) + R(t) - S_r(t)$



D_t :総需要量, $S_n(t)$:再製造品販売量, $S_r(t)$:新製造品販売量
 $M(t)$:製造量, $R(t)$:再製造量, t :期間,
 λ_p :使用期間が p である製品の回収率

□ 検査工程の処理 [$L_i > U$?] について

- すべての製品には寿命が存在し、寿命は顧客の使用によって単調に減少する。
- 製品*i*の残寿命を L_i とする
- 製品の最大使用期間を U とする
- 回収された使用済み製品は残寿命 L_i を検査され $L_i > U$ を満たさなければ廃棄される

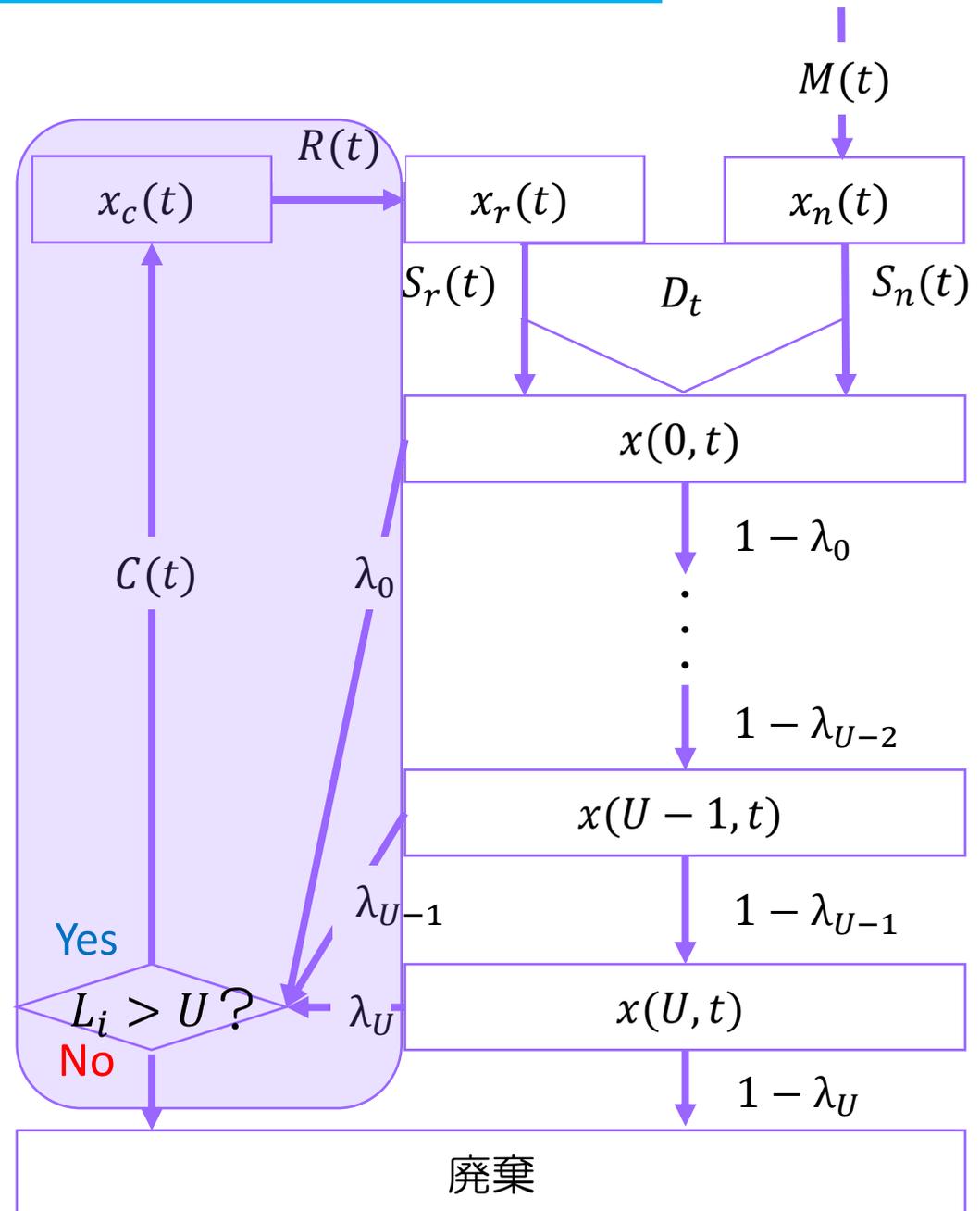
□ 回収量 $C(t)$

回収された製品のうち、残寿命の検査を通過した製品のみ、回収量 $C(t)$ として計上される

$$C(t) \leq \sum_{p=0}^U x(p, t-1) \times \lambda_p$$

□ 回収品在庫量 $x_c(t)$

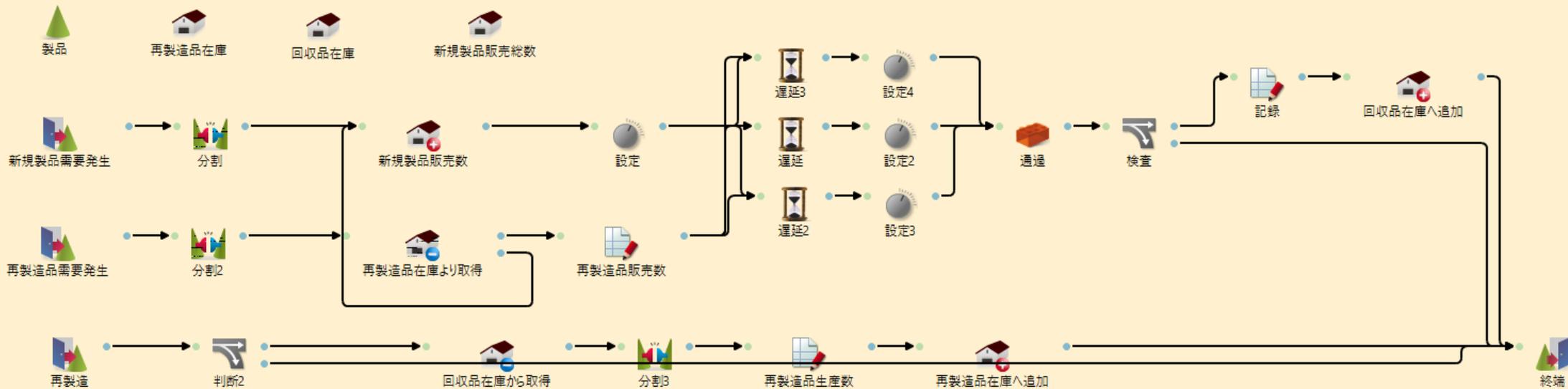
$$x_c(t) = x_c(t-1) + C(t) - R(t)$$



$x(p, t)$: 使用期間が p である製品の潜在在庫
 λ_p : 使用期間が p である製品の回収率
 $R(t)$: 再製造量, t : 期間

実装ポイント

- 各製品に「寿命」という属性を付与して数値を設定
- 使用期間に応じて「寿命」を減少させる
- シミュレーションを用いることで、顧客が使用中の製品を追跡し潜在的な在庫として再現できる！



本研究の目的

顧客が使用中の製品を潜在的な在庫とみなす循環型生産システムをモデル化し、潜在在庫の管理がシステムの安定性に与える影響を分析する

- 潜在在庫の管理は、再製造品の販売量を制限することで実施する
- 安定性の評価には、回収量と製造・再製造量の変動の大きさをを用いる



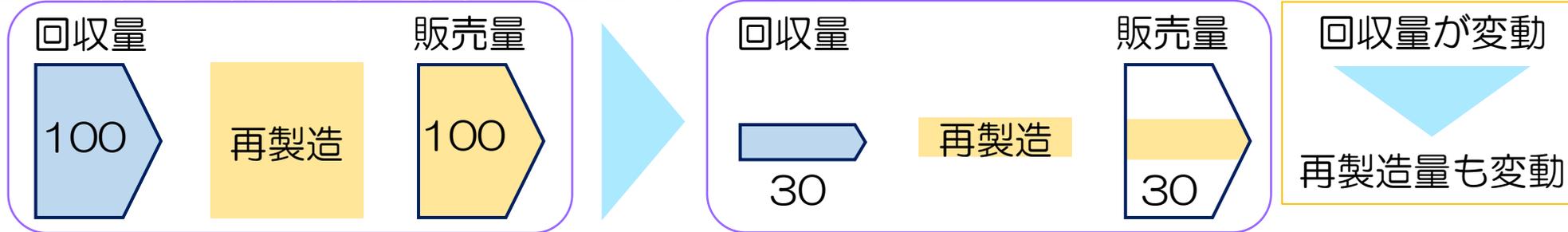
- ① 「再製造品の販売量の制限」が異なる3シナリオを用意
- ② 「回収量と製造・再製造量の変動の大きさ」をシナリオ間で比較

※「再製造品の販売量の制限」は、定式化されたモデル上で「*Limit*」と表現されている

実験計画：シナリオ設定

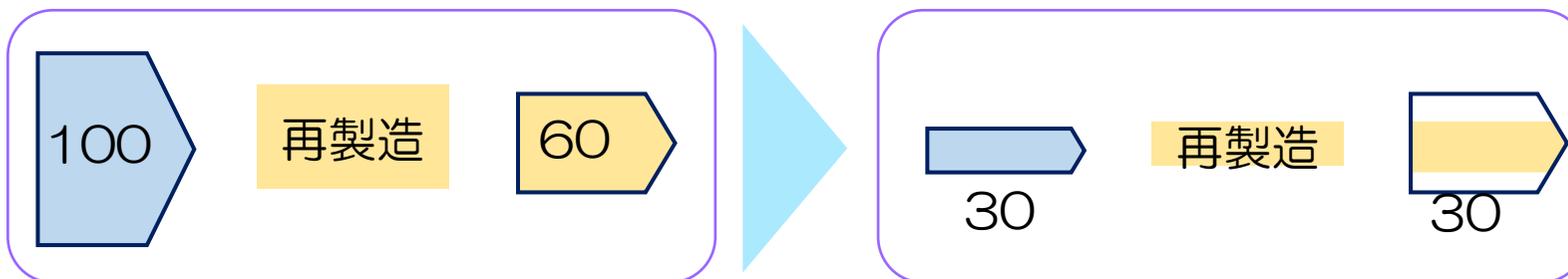
①従来シナリオ(Limit = 100)

再製造品の販売量を制限せず，潜在在庫を管理しないシナリオ



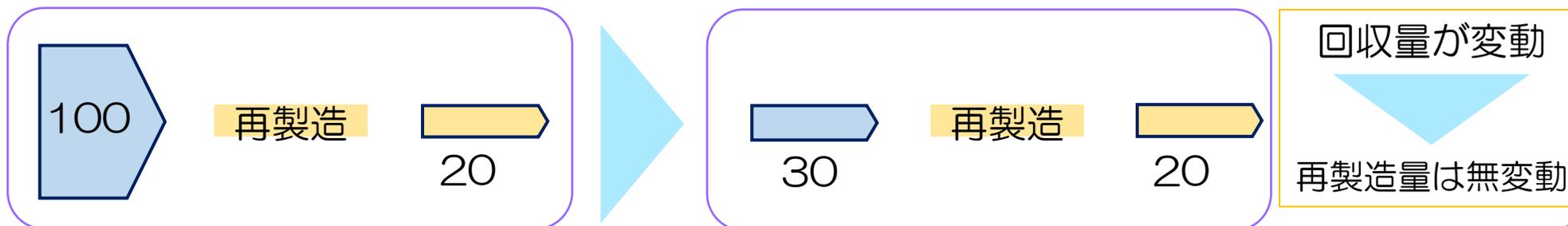
②バランスシナリオ(Limit = 60)

再製造品の販売量をほどほどに制限したシナリオ



③管理シナリオ(Limit = 20)

再製造品の販売量を大きく制限し，潜在在庫に入る再製造品の数を管理するシナリオ



記号	説明
D_t	t 期の総需要量 (個)
U	顧客の最大使用期間 (期間)
λ_p	使用期間が p 期間である製品の回収確率 ($0 \leq \lambda_p \leq 1$)
L_i	製品 i の残寿命 (期)
$Limit$	再製造品の販売量制約(個)

- 従来シナリオ
 $Limit = 100$

- バランスシナリオ
 $Limit = 60$

- 管理シナリオ
 $Limit = 20$

- $D_t = 100$
需要は期ごとに100発生する

- $U = 5$
顧客は製品を最大で5期使用する

- $L_i = 10$ (製造時)
新製造品の寿命は10である

- $\lambda_0, \lambda_1 = 0$
顧客は製品を少なくとも2期使用する

- $\lambda_2 = 0.33$

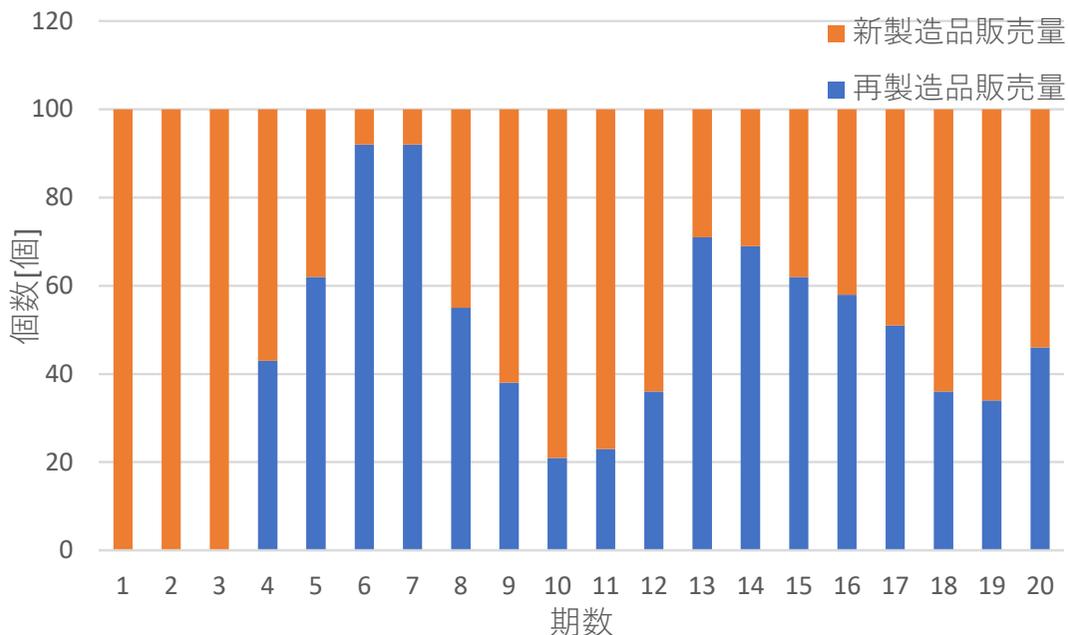
- $\lambda_3 = 0.5$

- $\lambda_4 = 1$

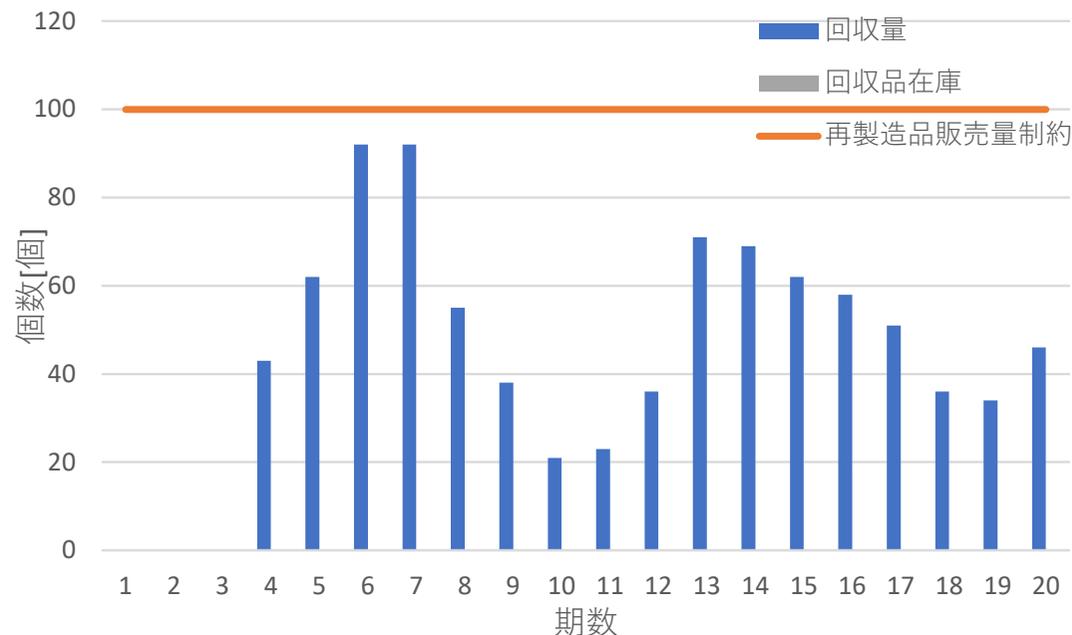
製品の使用期間は3~5の一様分布とし、5期使用された後は必ず回収される

実験結果：従来シナリオ

20



新製造品・再製造品販売量

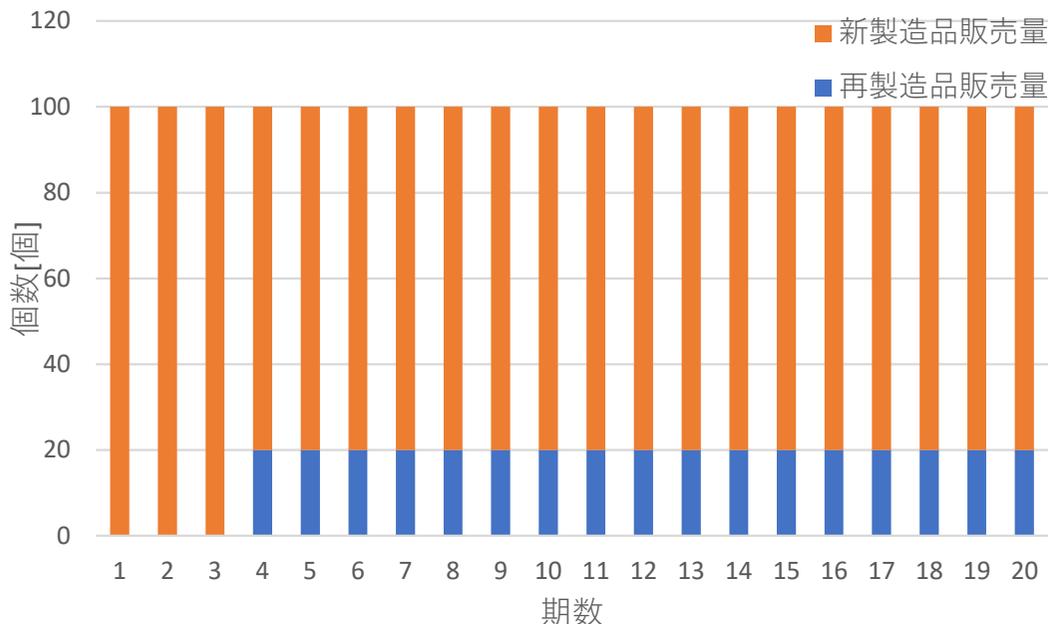


回収量と回収品在庫

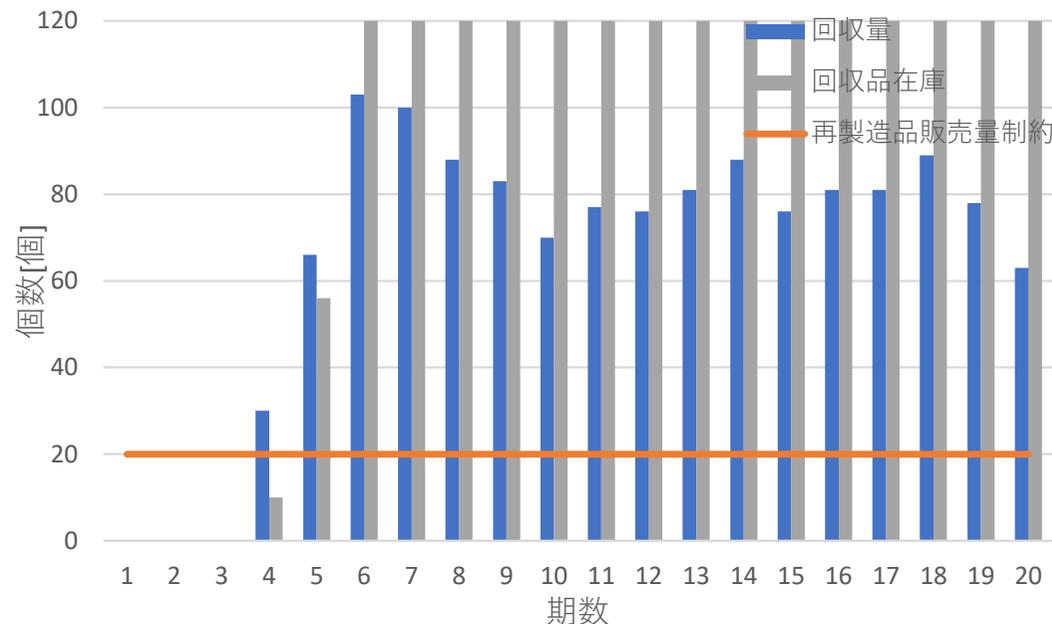
- 回収品在庫が常に0 → 回収品をすべて再製造品として販売できている
⇒ 回収した使用済み製品を用いて無駄なく利益をあげているある種の理想的な状況
- 販売量，回収量は波のように変動 → 製造・再製造量も大きく変動
⇒ 本シナリオを現実に応用した場合，安定性の課題が発生してしまう！

従来シナリオは，大きな変動に対応できる企業のみ実施可能

設備稼働率の低下
作業人数の調節などなど
現場の負担が増加！
+
サプライチェーン全体の問題発生



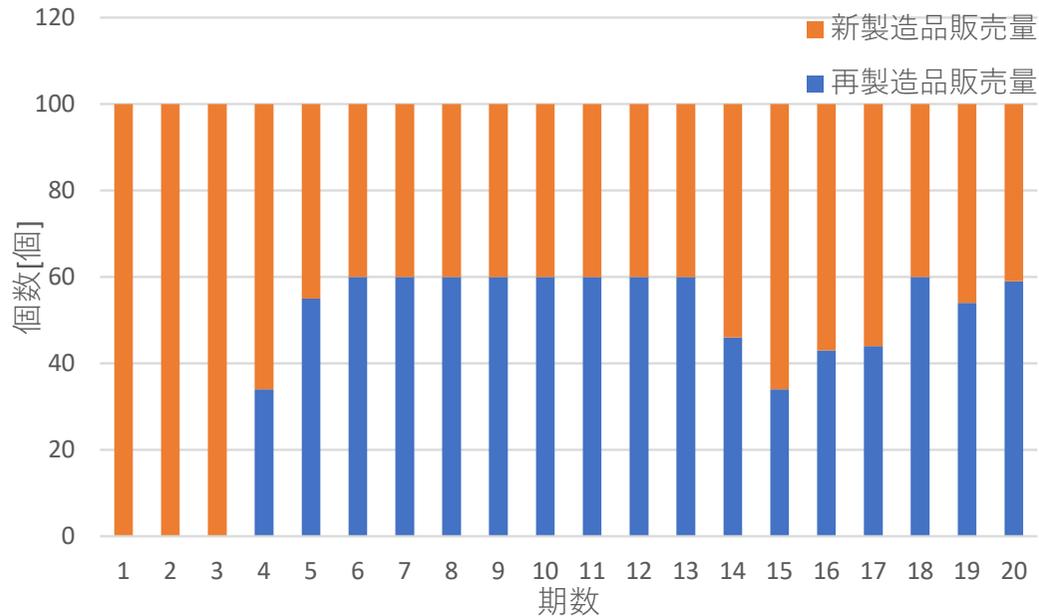
新製造品・再製造品販売量



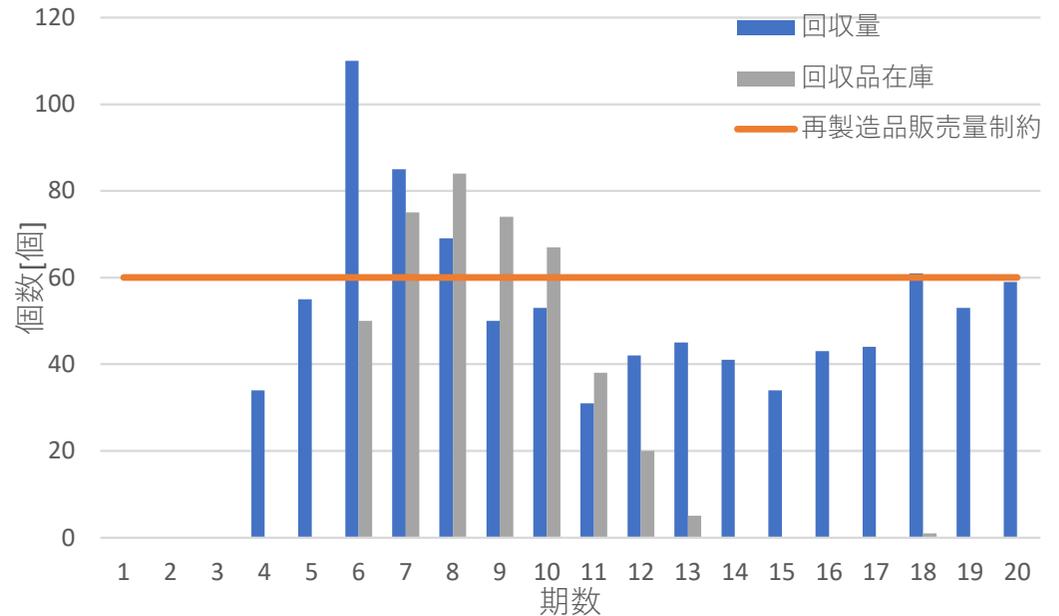
回収量と回収品在庫

- 再製造品の販売量は常に20→安定した循環型生産システムを実現
⇒再製造品の販売量を制限し，市場在庫を管理することで安定性の課題を解消
- 回収量が販売量を常に上回っている→回収品在庫が減らず過剰に！
⇒過剰在庫を売却，あるいは廃棄する必要があり，ムダな費用が発生してしまう

多くの企業にはある程度の変動に対応する能力があるため，これほど厳格な安定性は必要ない？



新製造品・再製造品販売量

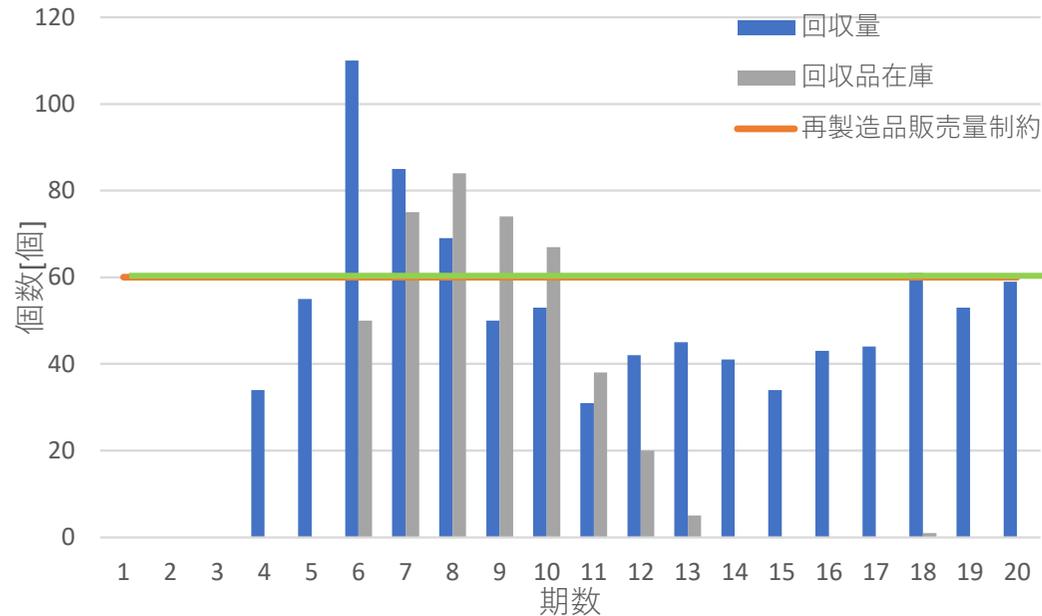


回収量と回収品在庫

- 多少の変動はあるものの、従来シナリオに比べれば安定した製造・販売ができています
⇒ 潜在在庫の管理は、程度が小さくとも効果があることを示した
- 一時的に回収品在庫が発生するが、最終的には0になっている
⇒ 回収した使用済み製品は、再製造品としてすべて販売しきれている

潜在在庫の管理を適切な程度で行うことで、安定性と経済性を両立できることを示唆

企業によって、許容できる変動は異なる



変動を許容できる企業は
潜在在庫の管理を緩和し
工場内在庫を減らすことができる

変動が許容できない企業は
潜在在庫の管理を厳格化し
工場内在庫を増やすことで対応

企業によって適切な潜在在庫の管理は異なる

最適な管理を提案するためには？

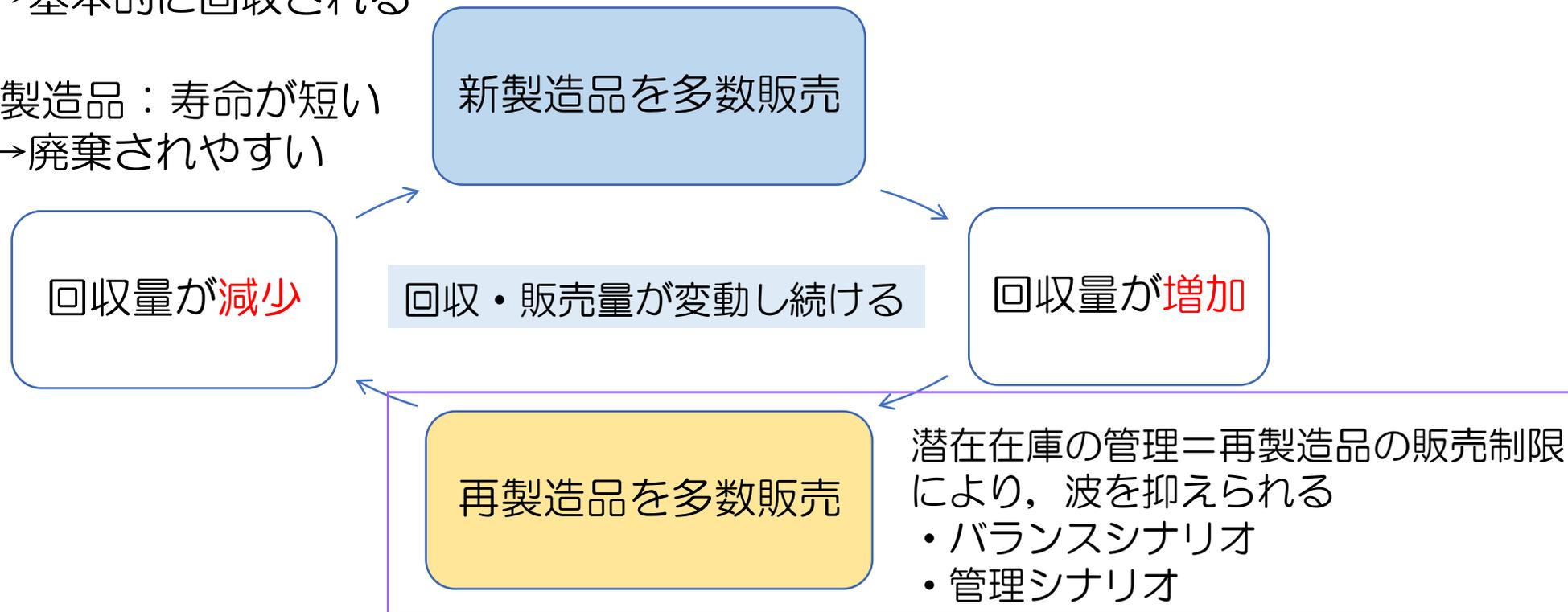
「変動」という曖昧な指標を数値化し、検討していく必要がある

考察：なぜ波のような変動が起きたのか？

24

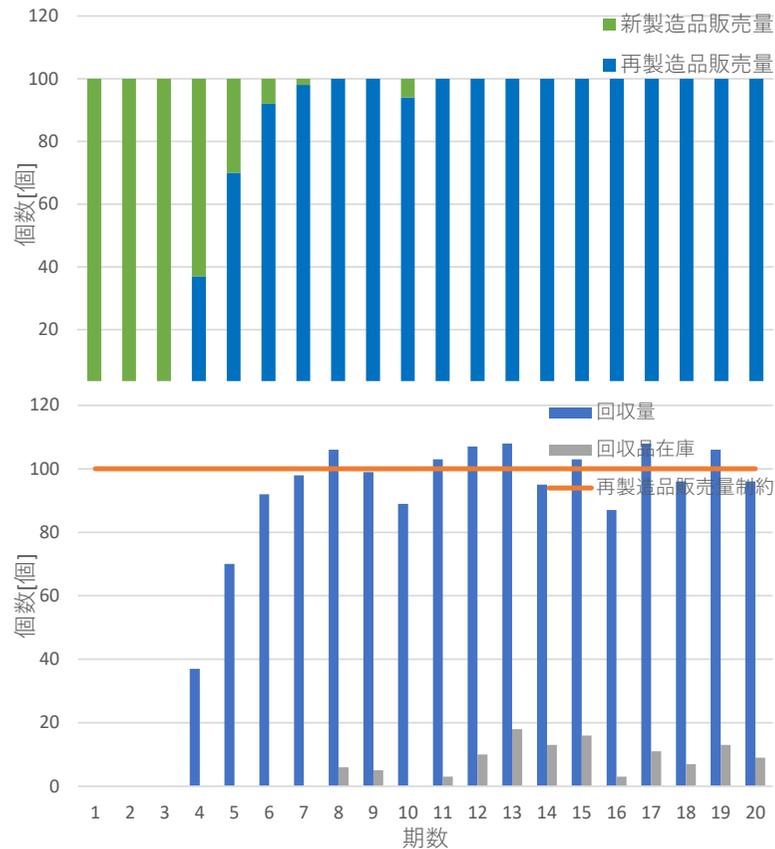
製品の残寿命が少ない場合、回収されずに廃棄されるから

- 新製造品：寿命が長い
→基本的に回収される
- 再製造品：寿命が短い
→廃棄されやすい

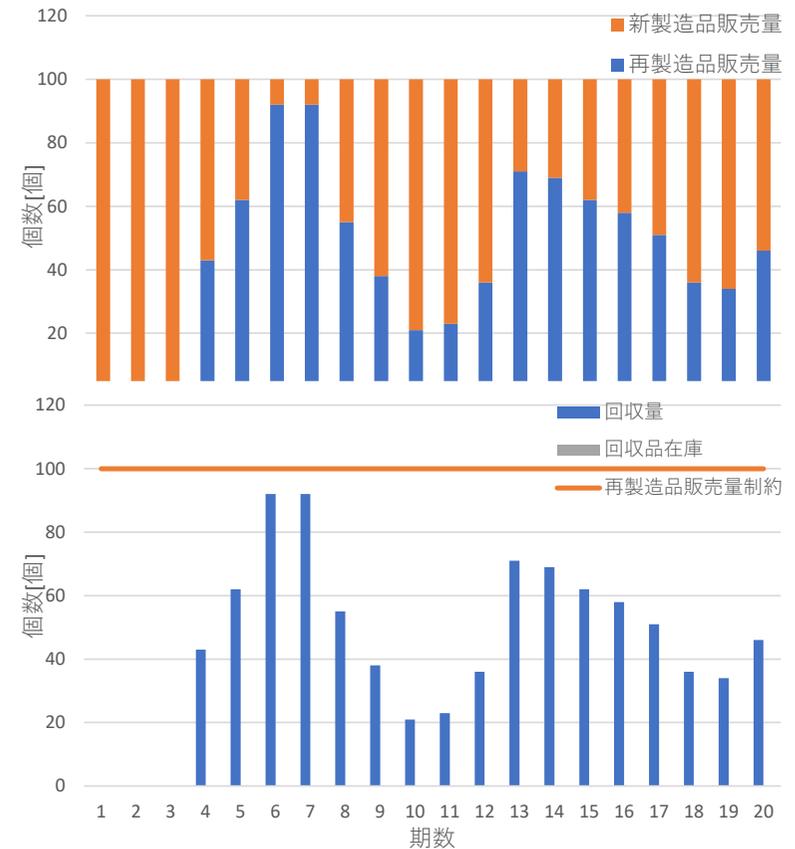


製品に寿命がなければどうなるのか？

寿命がない条件での結果



従来シナリオ（比較用）



- 製品の寿命がなくなることで、製品が廃棄されなくなり、安定性を獲得
⇒寿命がなくなることは非現実的だが、寿命を延ばすことの有用性を示唆

定期的なメンテナンスなどにより、潜在在庫の品質を管理し、寿命を延ばすことが結果的に安定性の確保につながる？

本研究における潜在在庫の管理方法

市場在庫に入る再製造品の数を制限し，寿命が長く，回収する価値の高い新製造品を一定以上市場在庫へ入れること

- 単純に販売量を制限することで実施可能
⇒在庫の増加や販売機会損失などのデメリットあり

追加実験で示唆された潜在在庫の管理方法

市場在庫に入った製品を，定期的なメンテナンスなどにより品質を高め，寿命を延ばすこと

- 部品の長寿命化やモジュール化設計など，製品設計から管理を行う必要あり
⇒資源効率性を上げ，定期的なメンテナンスによる顧客の囲い込みが可能？



各管理方法による費用対効果などを算出し，比較が行えるようにしたい！

本研究の目的

顧客が使用中の製品を潜在的な在庫とみなす循環型生産システムをモデル化し、潜在在庫の管理がシステムの安定性に与える影響を分析する

結果

- ✓ 潜在在庫の管理により、システムの安定性を高められることを示した
- ✓ 管理をしない場合、回収量・製造量が波のように変動した
- ✓ 管理を厳格にしすぎた場合、過剰在庫などの悪影響が発生した

今後の方針

- ✓ 「変動」などを数値化し、評価指標を統一することで比較検討ができるようにする
- ✓ 追加実験によって得られた潜在在庫の新たな管理方法をモデル化し、考察する

研究の最終目標

各企業扱う製品の特色などに合わせた最適な潜在在庫管理手法の提案

- [1] 「気候変動に関する世論調査」 (内閣府)
<https://survey.gov-online.go.jp/r02/r02-kikohendo/index.html>
閲覧日 (2021/10/19)
- [2] 「SDGs・社会課題に関する意識調査」 (損保ジャパン)
https://www.sompo-japan.co.jp/-/media/SJNK/files/news/2021/20210802_1.pdf
閲覧日 (2021/10/19)
- [3] Minner, S.: “Strategic safety stocks in reverse logistics supply chains”,
Int.J.Production Economics Vol.71, pp.417-428 (2001)
- [4] 有光大幸, 中島健一, 能勢豊一, 栗山仙之助: 「循環型生産システムの構築に関する研究」, 日本経営工学会論文誌, Vol.54, No.1, pp19-25(2003)
- [5] 有光大幸, 中島健一, 能勢豊一, 栗山仙之助: 「循環型生産システムの最適生産政策に関する研究」, 日本経営工学会論文誌, Vol.55, No.3, pp138-144(2004)