

ディスクリート工場内の在庫数適正化のための 離散イベントシミュレータの開発

Development of a Discrete Event Simulator for Inventory Optimization in Discrete Factories

佐々木健太^{1,4} 宇野健介¹ 笈田佳彰¹ 中川将士² 松永親幸² 加藤雅彦³ 稗方和夫⁴

Kenta Sasaki¹, Kensuke Uno¹, Yoshiaki Oida¹, Masashi Nakagawa², Chikayuki Matsunaga²,
Masahiko Kato³, and Kazuo Hiekata⁴

¹ 富士通株式会社

¹Fujitsu Limited

² ヤマハ熊本プロダクツ株式会社

² Yamaha Kumamoto Products Co., Ltd.

³ ヤマハ発動機株式会社

³Yamaha Motor Co., Ltd.

⁴ 東京大学

⁴ The University of Tokyo

Abstract: Discrete factories are subject to various uncertainties, such as equipment failures and the occurrence of defective products. Intermediate inventory is held to prepare for these uncertainties, but it is difficult to optimize the inventory level considering various factors such as lead times and inventory space. In this study, we develop a discrete event simulator to optimize inventory levels, targeting discrete factories that hold intermediate inventory and carry out mixed-model production. We evaluate its effectiveness using real data from a discrete factory that manufactures outboard motors.

1. はじめに

組み立てにより製品・部品を製造するディスクリート工場には、設備故障や不良品発生などの様々な不確実性が存在する。不確実性の後続の工程への影響を最小限とするため、工場内に適切な数の中間在庫を保持することが重要である。工場内の中間在庫数の決定は現場に蓄積されたノウハウに基づいて行われているが、製造リードタイムや需要、在庫保有スペース、コストなどの多様な要素を考慮し、在庫数を適正化することは困難である。そのため、データや数理的なモデルに基づいたアプローチにより、中間在庫数を決定することが求められている。

離散イベントシミュレーションは、複雑な製造工程をモデル化および最適化するために広く適用されており、自動車、電子部品など、様々な製品・部品の製造工程の改善に役立てられている。[1]

本研究では、工場内に中間在庫を保持し、多品種混流生産を行うディスクリート工場を対象とし、製造工程の離散イベントシミュレータを開発する。開発したシミュレータを用いて、船外機を製造するディスクリート工場の実データを用いた在庫数の決定戦略の評価を行い、在庫数適正化に対するシミュレータの有効性を確認する。

2. 関連研究

離散イベントシミュレーションは、製造工程のモデル化と最適化に広く利用されている。製造工程のシミュレーションを行い、what-if シナリオ分析や遺伝的アルゴリズムなどの人工知能関連技術を用いて、製造システムを最適化する手法が提案されており、製造時間やスループット、ボトルネック削減などの意思決定に利用されている。[1]

加えて、在庫の最適化の文脈においても、補充ポ

リシー、発注ポリシー、ロットサイズの決定、そして、安全在庫の割り当てポリシーなど、様々な在庫管理戦略の決定に離散イベントシミュレーションが利用されている。[2]

多品種混流生産を行う製造工程における在庫管理では、多数の部品品種の中で、どの品種の在庫をどの程度持つのかを決定することが重要となる。その際、多数の製造設備と部品の複雑な関係性、および、製造設備における不確実性を考慮することが必要となるが、多品種混流生産を行うディスクリート工場における不確実性を考慮して、工場内の中間在庫の適正化を行った研究は、十分に行われていない。本研究では、多品種混流生産を行うディスクリート工場において、不確実な状況下で工場内の中間在庫数の適正化を行うための離散イベントシミュレータを開発する。その上で、船外機を製造するディスクリート工場の実データを用いて、シミュレータの有効性の評価を行う。

3. 提案手法

3.1 多品種混流生産の製造工程と中間在庫

多品種混流生産を行うディスクリート工場の製造工程の概要を図1に示す。図1は2つの工程で構成される製造工程の例である。ディスクリート工場の製造工程は、複数の工程で構成され、原材料を複数種類の最終製品を製造する。各工程には、複数のラインが存在し、各ラインで製造できる部品品種は決まっており、単一のラインで複数の品種の部品を製造できる。また、各ラインでの作業には、原材料や前工程で処理された中間部品が必要となる。設備故障等の不確実性に備えるため、各工程の加工後の部品の在庫を保持する場合がある。いつどの部品をどれだけ製造することを定めた生産計画に沿って製造が行われることが一般的である。ここまでで述べた本研究でシミュレーションの対象とする多品種混流生産を行う製造工程の特徴を表1にまとめる。

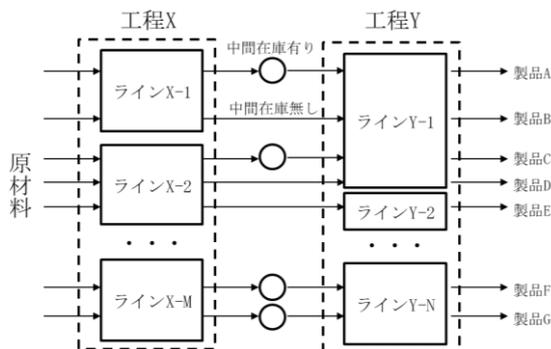


図1 多品種混流生産を行うディスクリート工場

表1. 多品種混流生産を行う製造工程の特徴

特徴 No.	多品種混流生産を行う製造工程の特徴
(1)	製造工程は複数の工程で構成される。
(2)	各工程に複数の製造ラインが存在する。
(3)	1つの製造ラインで、ラインごとに決まった複数種類の品種を製造できる。
(4)	各ラインでの製造には、部品品種ごとに決まった原材料や中間部品が必要となる。
(5)	設備故障等の不確実事象が発生する。
(6)	不確実事象に備えるため、工程の途中に中間部品の在庫（中間在庫）を保持する。
(7)	需要量や製造リードタイム、在庫量等を考慮し、どのラインで、どの部品を、いつ製造するかを定めた生産計画が決定される。

部品品種の数が多く各品種の生産量が少ない多品種混流生産のディスクリート工場では、在庫スペースや管理コストの観点から、全ての品種の在庫を保持することは難しい。過剰な在庫を保持する保管コストが増加するのに加え、在庫スペースを複数品種で共有している場合は、他の部品の在庫を持つことが難しくなる。そのため、可能な限り少ない在庫で不確実性に対処するために、どの部品の在庫を、どの程度持つのか、という在庫保有戦略が重要となる。

在庫保有戦略は、現場に蓄積されたノウハウに基づいて決定されている。膨大な部品品種について、製造リードタイムや需要、在庫スペースなどの多様な要素が考慮される。加えて、設備故障や不良品発生などの様々な不確実性の影響を考慮する必要があるが、現場ノウハウをもってしても、不確実性の影響は考慮しきれない場合があるのが現状である。そのため、不確実性を考慮したシミュレーションにより、在庫保有戦略を評価することが求められる。

3.2 製造工程の離散イベントシミュレータ

本研究では、多品種混流生産を行うディスクリート工場において、多数の部品の製造リードタイム、在庫スペース、そして、製造工程に存在する不確実性を考慮し、適正な中間在庫数を決定するための離散イベントシミュレータを開発する。開発するシミュレータの概観図を図2に示す。離散イベントシミュレータを開発し、在庫決定戦略に基づいた際の在庫数の推移を確認し、在庫決定戦略を評価する。

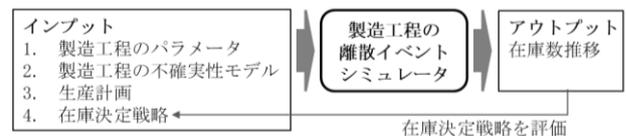


図2 シミュレータの概観図

表 2. 離散イベントシミュレータの要件と要件の実現方法

要件 No.	シミュレータに求められる要件	対応する特徴 No.	要件の実現方法
1	複雑な工程・ライン、部品、在庫スペースの特徴とその関係性の表現	(1), (2), (3), (4), (6)	各工程、ライン、部品、在庫スペースの持つパラメータとその関係性を実データから設定
2	製造設備で生じる不確実性（設備故障）の表現	(5)	過去の設備故障データを基に、設備故障の発生を確率的にモデル化
3	生産計画に従った製造の表現	(7)	過去データの生産計画の実データを利用
4	在庫数の決定戦略の評価	-	シミュレーションでの不足在庫数と品種数を評価

製造工程の特徴を捉えたシミュレーションを行い、適正な中間在庫数を決定するために必要となるシミュレータの仕様とその実現方法を表 2 に示す。

表 2 の要件 No.1 については、各ラインで製造できる部品が決まっており、かつ、1 つのラインで複数種類の部品を製造できることを想定し、シミュレータ内で、これらのラインと部品の関係性を表現する必要がある。ライン・品種ごとに製造リードタイムは異なっている。そのため、製造リードタイムは、ライン・製造品種ごとに異なるパラメータを設定し、各製造ラインと部品の関係性を表現する。このパラメータは各ラインの過去の製造実績を基に設定する。

表 2 の要件 No.2 については、製造工程には、設備故障等の不確実性が発生し、不確実性の発生は確率的な事象としてモデル化できる。設備の故障の表現には、設備の故障間隔と故障からの復旧に掛かる時間を表現する必要があるため、故障間隔と故障からの復旧に掛かる時間をそれぞれ指数分布に従う確率変数でモデル化する。指数分布は、確率密度関数 $f(x)$ が下記で表現される分布で、独立して一定確率で発生する事象を表現できる。

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$$

ここで、 λ は指数分布のパラメータであり、事象が単位時間あたりに発生する回数を表し、過去の故障データを基に製造設備ごとに固有の値を設定する。

表 2 の要件 No.3 については、生産計画策定は本研究の検討の範囲外とし、生産計画はシミュレータへのインプットとして与えられるものとした。

表 2 の要件 No.4 については、必要とする中間部品が前工程から供給できない場合には、後工程の作業停止や納期遅延等に繋がるため、中間部品の在庫不足の発生頻度は、在庫の意思決定の良し悪しの評価する重要な指標となる。本研究では、不足した在庫の総数、および、不足した品種の種類を在庫数の決定戦略の評価指標とする。

4. ケーススタディ

多品種混流生産を行う船外機のディスクリート工

場を対象として、開発したシミュレータの有効性を確認する。シミュレーション対象とする製造工程の概観を図 3 に示す。対象とする船外機の整合工程において、原材料は、鋳造、仕上げ等、加工の工程を経て、後工程へ供給される。なお、実際の製造ラインはより複雑な構成となっているが、シミュレーションを行うにあたり、一部を簡略化している。

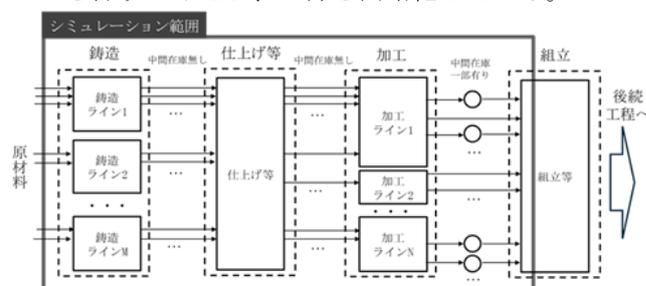


図 3 ケーススタディ対象のディスクリート工場

工場全体で、鋳造のラインは 13 ライン、加工のラインは 17 であり、200 種を超える部品を製造する。本ケーススタディでは、そのうち、各種データとの紐付けが行えた鋳造 11 ライン、加工 15 ライン、鋳造品種 44 種類、加工品種 75 種類を対象とする。仕上げ等の工程については、別会社での処理工程であり、利用できるデータが他工程と大きく異なることから、詳細なシミュレーションを行わず、全品種について固定のリードタイムを持つ工程として表現した。本製造工程では、全ての工程で 1 単位の部品を製造するためには、前工程の対応部品の 1 単位が必要である。本ケーススタディでは、実業務において最も重視されている加工工程を終えた後の中間部品の在庫量を適正化の対象とした。

表 2 の要件 No.1 については、部品構成表 (Bill Of Materials) 等の資料をもとに、実際の製造工程の工程、ライン、部品の対応関係を整理した。また、各ラインの製造リードタイムを過去の生産計画データをもとに設定した。また、在庫スペースについて、現実には部品ごとに必要な保管スペースの大小は異なるものの、全ての部品で同じ在庫スペースが必要であると仮定し、在庫量の上限を過去の在庫データにお

いて、最も保持している在庫が多かったタイミングの在庫量として設定した。

表2の要件 No.2 については、製造工程の不確実性として、設備故障をシミュレーションの対象とした。過去の設備故障のデータを1年分利用し、各ラインの単位時間あたりの平均故障回数と平均修理時間を算出し、指数分布のパラメータに反映した。

表2の要件 No.3 については、実際の生産計画を用いて、14日間分の製造をシミュレーションした。ただし、現実の製造業務においては、生産計画は在庫量や設備故障状況を踏まえて随時見直しが行われているが、本ケーススタディでは、そのような日々の業務の中で行われる生産計画見直しは検討の対象外とし、あらかじめ決められた計画通りの製造を行った場合の製造状況をシミュレーションした。

表2の要件 No.4 については、シミュレーション時の在庫数の推移を評価対象とし、在庫が後続の需要を満たせなかった品種の種類、および、不足した在庫の総数を評価した。

開発したシミュレータにおいて、比較的単純な2つの在庫保有戦略を想定し、製造のシミュレーションを行った。1つ目の在庫保有戦略 A は、全ての品種について同じ数だけの在庫を保持する戦略である。2つめの在庫保有戦略 B は、品種ごとに年間生産予定数量に比例する在庫を保持する戦略である。戦略 B は、戦略 A よりも実際の在庫戦略により近いものである。いずれの戦略も、初期値として保持する全品種の在庫総数は、過去データの在庫総数の平均と同じとなるように在庫数を設定した。在庫保有戦略ごとに、1日当たりの不足した在庫数、および、加工品種のうち在庫が不足する品種数の平均を評価した。結果を表3に示す。結果から、戦略 B は、戦略 A と比べて、在庫の不足数が約 58.9%、不足する品種数も約 90.2%と少なくなっており、戦略 A を設定するよりも、戦略 B に基づいて在庫を保持した方が、在庫不足を避けられることが分かる。これは、生産予定が少ない部品は、中間在庫の需要が発生する頻度・量が少なく、在庫を持たなくても在庫不足となることが少ないためである。シミュレーションでの日ごとの在庫不足品種数の時系列推移を図4に示す。全体として、消費予定に基づいた在庫保有戦略 B の方が在庫不足となる品種数が少ないが、生産量の少ない品種の需要が発生した場合は、在庫保有戦略 A よりも在庫不足品種が増える場合がある。以上の結果から、シミュレーションによって異なる在庫保有戦略を評価できることが確認でき、単純な在庫保有戦略 A よりも実際の現場で行われている意思決定に近い在庫保有戦略 B の方が、在庫不足を避けられることが明らかとなった。ただし、表3の不足

在庫数・品種数は、現実の製造工程で発生している数よりもはるかに多い結果であった。これは、現実の製造工程では、製造の状況を踏まえ、在庫不足が発生しないよう適宜生産計画の調整が行われるが、今回のシミュレーションはそのような調整を考慮していないことが一因である。より現実に近いシミュレーションとするためには、製造工程で行われる生産計画の調整を考慮する必要がある。

表3. 在庫保有戦略の評価結果

	在庫保有戦略 A 全品種の在庫を 同じだけ保持	在庫保有戦略 B 生産予定に比例 した在庫を保持
不足在庫数	425.9 個/日	250.9 個/日
不足品種数	5.1 品種/日	4.6 品種/日

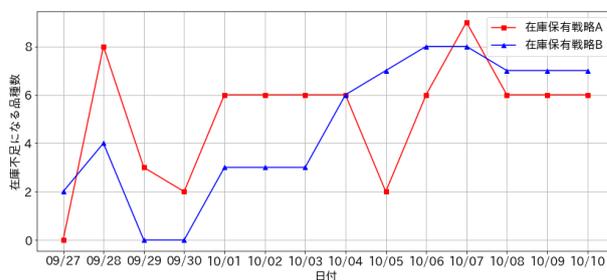


図4 日ごとの在庫不足品種数の時系列推移

5. まとめ

本研究では、多品種混流生産を行うディスクリート工場の在庫数を適正化するための離散イベントシミュレータを開発した。船外機の製造工程の実データを用いたケーススタディにより、在庫保有戦略の評価に利用できることを確認した。

謝辞

本研究の推進にあたり有益なフィードバックをいただいた MBSE+AI 分科会参加メンバーの皆様、および、実際の製造業務に関するヒアリングにご協力をいただいたヤマハ熊本プロダクツ株式会社の佐伯氏、橋本氏に深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Prajapat, Neha, and Ashutosh Tiwari. "A review of assembly optimisation applications using discrete event simulation." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 30(2-3), 215-228, 2017.
- [2] Sbaji, Nouçaiaba, and Abdelaziz Berrado. "A literature Review on Multi-echelon Inventory Management Policies: Case of Assembly Systems." *International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IOEM)*, 2022.