

進捗状況を考慮したフローショップスケジューリング問題の研究

伏屋, 隆央 / FUSEYA, Takao

(発行年 / Year)

2005-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2005-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

平成 16 年度 修士論文

進捗状況を考慮した

フローショップスケジューリング問題の研究

A FLOW SHOP SCHEDULING PROBLEM
UNDERCONSIDERATION OF PROGRESS

指導教員 福田 好朗 教授

平成 17 年 2 月

法政大学大学院 工学研究科

システム工学専攻 修士課程

生産システム研究室

伏屋 隆央

Takao FUSEYA

【Abstract】

In the flow shop scheduling, if every due date of jobs is equal, minimum make-span in the schedule minimize the tardiness of jobs. The minimum make-span in the schedule does not always satisfy the due date constraints, if each due date of jobs is different. When work delay is happened in the schedule, the due date constraints is not satisfied. This problem is one of important items for keeping the due date in the scheduling.

In this research, the method for recovering work delay in a flow shop production is proposed. The method was the inventory in-process and lot-division. Firstly the problem is formulated as large-scale combinatorial problem, and the model is described. Finally, to solve the problem, the method using the Tabu Search is proposed.

【要旨】

フローショップにおけるスケジューリングで、ジョブの納期が全て異なる場合は、納期が全て等しい場合とは違い、メイクスパン（総加工完了時間）を最小にすることが納期遅れ時間を最小にするとは限らない。また、作業遅延が生じた時も納期が異なる場合は納期遅れが生じやすくなってしまう問題がある。

そこで仕掛在庫によって遅延を吸収し、その減少分を付け加えたスケジュールのロットを分割し納期遅れを解消する。その際、ロットの組み合わせ最適化問題を解く必要がある。本研究ではタブーサーチを用いてこれを解き、作業遅延を取り戻す手法を提案する。

第1章 はじめに.....	2
1.1 研究背景.....	2
1.2 研究目的.....	2
1.3 論文構成.....	3
第2章 生産スケジューリング.....	4
2.1 作業遅延.....	4
2.2 フローショップスケジューリング問題.....	5
2.3 ロットサイズ.....	7
2.3.1 ロット分割.....	8
2.3.2 ロットの組み合わせ.....	8
2.3.3 タブーサーチ.....	9
2.4 問題点.....	10
2.5 提案手法.....	13
第3章 シミュレーション.....	16
3.1 シミュレータ概要.....	20
第4章 数値実験.....	27
4.1 実験対象モデル.....	27
4.2 評価基準.....	28
4.3 実験条件.....	30
4.4 実験Ⅰ.....	31
4.5 実験Ⅱ.....	33
4.6 実験Ⅲ.....	35
4.7 実験Ⅳ.....	38
4.8 実験Ⅴ.....	41
4.9 考察.....	43
第5章 結論.....	44
参考文献.....	45
謝辞.....	46

第1章 はじめに

1.1 研究背景

かつての需要に対して供給が追いつかない環境と、現在の消費を取り巻く環境を比較すると大きく変化している。近年、消費者ニーズが多様化し、市場では短納期化や、多品種少量化から変種変量化を求める傾向が強まっている。これにともない、生産を取り巻く環境も益々複雑になっている。特に、日々変化を続ける需要を予測することは大変困難となり、生産計画を立案することは容易ではない。生産側はスピードと感度に富んだ生産システムを求めなければならない。

その環境の中で立案された計画に対する作業の遅れは、システム全体に手痛いダメージを与えてしまう。例えば、遅れを取り戻すために、特急オーダーを掛ける、または初期の計画に遅れた分を組み込むなどがあるが、どれも本来見込まれていた全体の出力量を下げってしまう。その結果、計画通りの生産ができていれば発生しなかった機会損失や、顧客への納期遅延による信用損失へと繋がってしまう。

つまり、全体の出力量をできるだけ下げずに、遅れを取り戻すにはどのようにすればよいかということが重要な課題となっている。

1.2 研究目的

市場の多品種少量化から変種変量化に伴い生産側は、複数のジョブをそれぞれ別々の納期に納めるように求められる。この点は生産計画を立案する時に、問題をより複雑にする。フローショップ型の生産形態においては、ジョブの納期が全て等しい場合は総加工完了時間を最小にする生産計画によって納期厳守に近づける。しかし、納期が別々の場合には総加工時間を最小にするだけでは納期を守れるとは限らない。

また、実際の作業が立案した生産計画通りに進められなかった場合も、納期が別々の方が全て等しいよりも納期遅れが生じやすくなってしまう。この遅れに対する対処が効果的でないと、システム全体の柔軟性が弱まってしまう。

そこで、本研究では、作業の遅れが発生する環境下での各ジョブの納期が異なるフローショップ・スケジューリング問題について、特に作業の遅れをどのように取り戻すかを提案し、シミュレーションによりその有効性を確認する。

1.3 論文構成

本研究論文は全 5 章から構成されている。第 1 章では研究目的について述べ、第 2 章では、作業遅延のもたらす問題、ジョブごとに納期が異なるフローショップスケジューリング問題について説明した後、本研究で提案する手法について述べる。続く第 3 章では、提案手法の検証を行うために構築したシミュレータについて述べる。そして、第 4 章でシミュレータを用いた数値実験を行い、結果を示す。最後に、第 5 章で本研究における結論を述べる。

第2章 生産スケジューリング

2.1 作業遅延

計画に対する作業遅延の原因には、機械や設備が停止してしまう「故障」や「チョコ停」、設備は動いているが直接利益に結びついていない「不良・手直し」などが考えられるが、本研究では「作業のばらつき」を中心として作業の遅れを考えた。

生産工程における作業は同じ作業を何千・何万回と繰り返すことに特徴がある。同じ作業を繰り返すが、その毎回の作業時間は、細かい要素が少しずつ変化するのでばらつきが発生するのは普通である。そのような作業の作業時間は、統計的には正規分布になることが知られている。正規分布の中心点を標準時間として設定すれば、予定よりも早く完了するも、遅れて完了するもそれぞれ50%の確率である。しかし、実際は計画に対して作業が早く完了することは滅多に起きず、それどころか、計画よりも大きく遅れることがしばしば起こる。これは工程が繋がっている場合の「遅れだけの伝播」という特徴である。

二工程間を例として考える。

表 2-1 遅延の伝播

前工程	後工程	全体
進捗	進捗	進捗
進捗	遅延	遅延
遅延	進捗	遅延
進捗	遅延	遅延

表 2-1 に示すように、遅れは伝播するが進みは伝播しないと考えられる。工場のように巨大なネットワークになるとなおさらで、この伝播によって工場の生産システムは混乱される。このように発生する混乱をどのように鎮めるかが大きな問題点となっている。

本研究においてもこの点を課題として取り扱う。

2.2 フローショップスケジューリング問題

顧客の注文に基づいて作成された個々の製造命令をジョブ（仕事）という。これを行うには、工作機械のような主要加工設備と治具、工具のような付帯設備が必要となる。これらの生産設備が物的システムをどのように構成しているかによって、図 2-1 のように分類することができる。

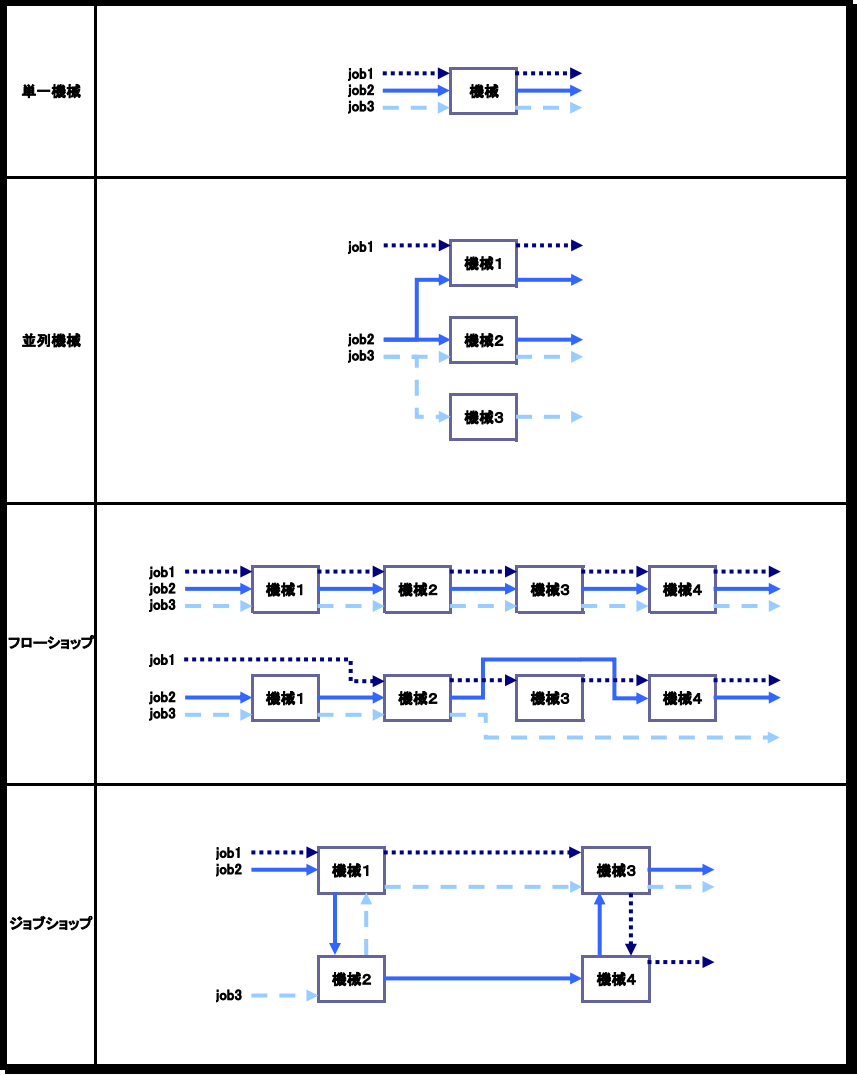


図 2-1 物的生産システムの構造による分類

すべてのジョブについて、生産設備の利用順序が同一である生産形態のフローショップを本研究では対象とする。

図 2-1 のようなフローショップにおけるスケジューリング（計画立案）では、各ジョブの納期が全て等しい場合は、メイクスパン（総加工完了時間）を最小にするスケジュールは、同時に納期遅時間も最小とする。しかし、各ジョブの納期が異なる場合は、必ずしもそれが納期制約を満足するとは限らない。例として図 2-2 をあげる。

ジョブ A,B,C,D の納期がそれぞれ 120,120,140,180 とする。

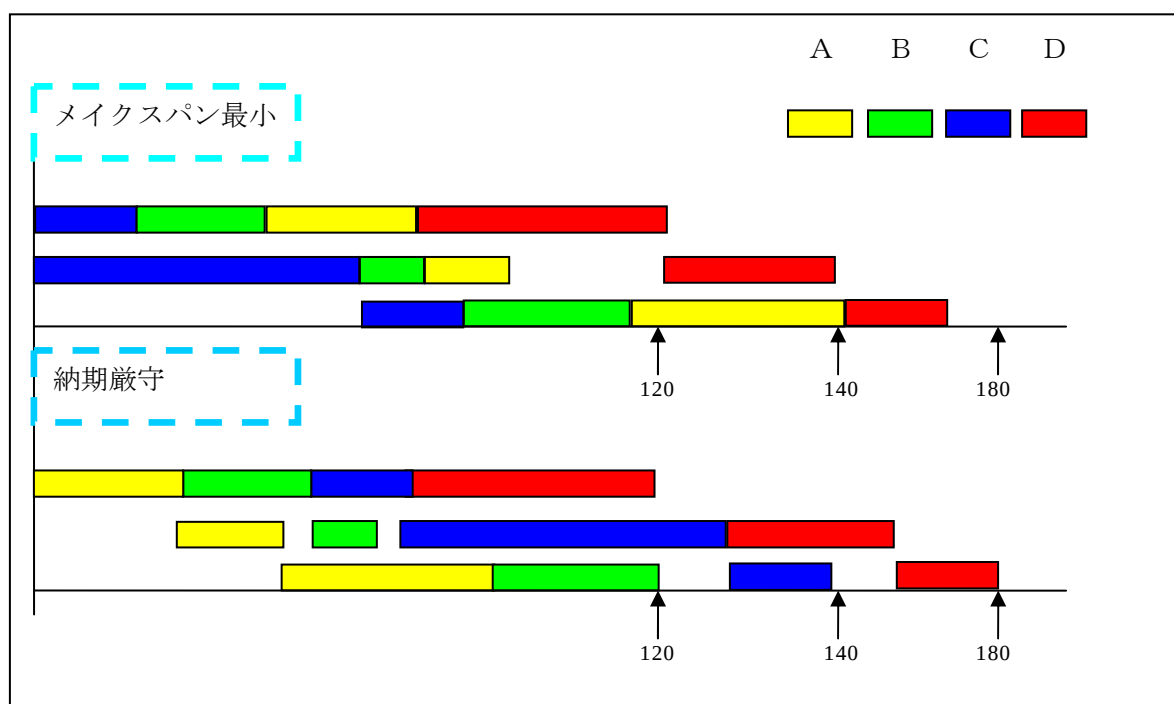


図 2-2 各ジョブの納期が異なるフローショップ問題

上のスケジュールの方がメイクスパンは短い。しかし、Aに関して納期遅れが発生している。このように納期がそれぞれ異なるジョブを対象としたスケジューリング問題では、メイクスパンを最小にするだけではないので複雑となる。

メイクスパンの大きさは、各ジョブの加工待ち時間や各機械の遊休時間に依存し、加工待ち時間と遊休時間のバラツキの大きさに依存する。そこで、各ジョブの要求量を幾つかの小ロットに分割して、加工時間のバラツキを小さくすれば、加工待ち時間と遊休時間は小さくなり、メイクスパンが小さくなるスケジュールを生成できる可能性がある。

そこで、このロット分割を行うことで、2.1 で取り上げた作業遅延を取り戻せないかと考えた。次の 2.3 では、遅延を取り戻すためのロット分割とロットの組み合わせについて説明する。

2.3 ロットサイズ

経済的かつ効率的に生産活動を遂行するためにグループ化された製品、部品、原材料などのまとまりをロットという。またその数量をロットサイズという。ロットには、購入ロット、製造ロット、検査ロット、搬送ロットなどがある。ロットサイズは一般に、それぞれの目的に適した形で、かつ経済的な大きさに設定される

2.3.1 ロット分割、2.3.2 ロットの組み合わせを説明するために、以下でモデルの条件を以下に示す。

【モデルの条件】

- (1) どのジョブも機械1→機械2→・・・の順に加工される
 - (2) どの機械も同時に複数のジョブを加工できない
 - (3) 加工順序はどの機械も同じである〔ジョブの追い越しはなし〕
 - (4) 段取り替時間はロットサイズに独立で一定である〔ただし、分割した同じジョブのサブロットが続けて加工される場合は、後ろのサブロットの段取りは必要ない〕
- ここで、本研究論文で使用する記号を説明し、次に(4)を下の(1)式で表現する。

n ; ジョブ数	m ; 機械数	M_i ; 機械の種類 j
J_i ; ジョブの種類 i	D_i ; J_i の納期	S_{ij} ; J_i を M_i での段取時間
P_{ij} ; J_i を M_i での加工時間	N_i ; J_i の分割回数	
J_{ik} ; J_i を 分割した時の k 番目のロット	C_{ikj} ; J_{ik} の M_i での加工完了時間	
Y_k ; N_i の上限		

$$C_{(ik)j} = \max(C_{(ik)j-1}, C_{(ik-1)j}) + \alpha \cdot S_{(ik)j} + P_{(ik)} / Y_k$$

$$\alpha = \begin{cases} 1 & (\text{不連続}) \\ 0 & (\text{連続}) \end{cases} \quad \dots \dots \dots (1)$$

2.3.1 ロット分割

分割回数は大きいほど近似の精度がよいが、加工時間、段取り時間、納期、加工順序に依存する上限が存在する。ジョブの分割回数の上限は以下のように求めることができる。

まず、分割を考慮しない普通のスケジューリング問題を解き、計画（初期計画）を立案する。このスケジュールがすべてのジョブの納期を満足にしていれば、それが求める解である。もし、納期を満たしていないジョブがある場合は、 J_k の分割回数の上限である Y_k は以下の(2)式を満たす整数値として求めることができる。

$$Y_k \leq \max(2, (D_k - C_{km}) / S_{km}) \quad \dots \dots \dots (2)$$

2.3.2 ロットの組み合わせ

式（１）～（７）の問題はロットサイズと加工順序の同時決定問題となるが、ロットサイズは加工順序に依存し、加工順序はロットサイズに依存するため、これを説く方法は存在しない。この問題において、最初に分割数 N_k とジョブ i の分割比率 r_{ik} を決定すれば、サブロットの順序付け問題になる。この順序付け問題を解いて、サブロットの加工順序 Q が決定してはじめてロットサイズが決定する。

例えば、 $N_k = 3$ $\{r_{ik}\} = \{0.6, 0.3, 0.1\}$ を決定して順序付け問題を解いた結果が、の時は、ロットサイズが 0.7 および 0.3 の二つに分割され、の時は、0.9 および 0.1 の二つに分割される。しかし、どのように分割比率を決定すれば納期遅れが解消できるかについては、順序付け問題を解くまで分らない。しかも、このような分割比率の組み合わせは無限に存在する。従って、各ジョブの分割回数と分割比率を決定して、対応する順序付けを解き、更により良いスケジュールを求めて、別な分割回数と分割比率に対応する順序付け問題を作成し、それを解く繰り返しを行うと、無限に存在する分割問題を解く必要がある。そこで、あらかじめの分割回数を非常におおきな数字に選び、 J を N 等分した順序付け問題を解けば、加工順序を決定すると同時にロットサイズを決定できる。

例えば、ロットサイズが 0.7 および 0.3 の二つのジョブに分割しないと、納期制約を満たすスケジュールが得られない場合、分割回数を 10、分割比率をすべて 0.1 のサブロットに分割すれば、同じジョブ J のサブロットが 7 連続および 3 連続として現れる加工順序が実行可能スケジュールとなる。また、ロットサイズが 0.72 および 0.28 の場合の近似解が得られる。

つまり、ジョブ数 N 、機械数 m のフローショップ問題となる。解候補のスケジュール

の総数は $N!$ 通り存在し、 n と各 N が大きい場合は大規模な組み合わせ問題となり、実用的な計算時間内に最適スケジュールを求める有効な解法は現在のところ存在しない。そこで、このような組み合わせ最適化問題を効果的に解くことのできるタブーサーチ (TS) を適用する。

次の 2.3.3 で TS について説明する。

2.3.3 タブーサーチ

タブーサーチ (TS) とは、組み合わせ問題の解法として近年よく用いられるようになったメタヒューリスティックスの一解法である。TS は「探索記憶を持たない」シミュレーテッドアニーリング (SA) や遺伝的アルゴリズム (GA) とは異なり、また、厳密に記憶を使用するアプローチである、分岐限定法とも異なっている。TS の特徴の一つは、適応型 (柔軟な) 記憶を系統的に利用することにある。TS のもととなる中心的な考えかたは、

- ①.短期記憶要素：この要素は、TS アルゴリズムの核である
- ②.中期記憶要素：この要素は、領域単位に探索を強化するために使用する
- ③.長期記憶要素：この要素は、大域的に検索を多様化するために使用する

の三種類の記憶要素を利用することである。

以下に本研究において開発したシミュレータにこれらの記憶要素をどのように反映させたかを説明する。

短期記憶：

役割は、ある検索方向をタブー (禁止) とすることである。検索は、タブーリスト T という記憶を利用して、最も新しくチェックした解から離れる方向に向かってゆく。この記憶は、新しくチェックした順に、 k 個の遷移 (move) の属性をもっている。タブーリストのサイズ k は、ある遷移が実行された後、この属性をもつ遷移の実行を禁止する回数を表す。しかし、既にチェックした解に戻ることを、タブーリストを利用することによって防ぐことができるが、その前までにチェックできなかった解のチェックをも禁止してしまう可能性がある。そこで、願望水準 (aspiration criteria) が導入される。これにより、タブーリストに含まれたある解が、願望水準を満たした時にはチェックの対象とすることができる。

本研究ではタブーリストのサイズ $k = 4$ 、評価値を各ジョブにおける納期遅れの合計としている（正の整数）。また、願望水準はそれまでの探索で得られた最小の評価値よりも小さい解が得られた場合にタブー状態を無視するというようにした。

中期記憶：

役割は、検索を強化することである。ある期間に生成された試行解のうちで、最良の解から複数 ($> k$) 個の解を選択し、それらに共通した特徴に注目する。そしてその特徴を検索処理に反映させる。

本研究では、最良解が得られるのは、異なるジョブから分割されたサブロット同士を入れ替えた時だけという特徴がある。つまり、同じロットから分割されたサブロット同士を交換しても最良解には近づかない。そこで、その検索処理が行われる場合に、評価値にペナルティーを加えた。このことにより、無駄な検索を減らし、より早く最良解に近づくようにした。

長期記憶：

役割は、検索を多様化することである。これは中期記憶とは正反対のもので、それまでに検索した領域とは異なった新しい領域に検索処理を導くことである。そのために、検索を新しい出発点に導く評価処理を作成すればよい。

本研究では、それまでの検索処理で交換された頻度を保存し、この交換回数にもとづいてペナルティーを与え、それまでに交換された頻度が最も高いものを選択しないようにした。

以上、2.3 で説明した方法で、作業遅延を取り戻せるかどうかを検証したが、ロット分割遅れを取り戻せない事がわかった。次の 2.4 でそれらの問題点を説明する。

2.4 問題点

ロット分割とロットの組み合わせで作業の遅れを取り戻すことを目標に、次の方法で簡易実験を行った。それは、作業が遅れた場合に、次期の計画のジョブをロット分割・組み合わせを行い、作業を前倒しに行うことでできた空き時間に遅れた作業を割り振る方法である。以下に、条件とフローを示す。

【条件】

- 1) 見込み受注生産環境とする
- 2) 見込品のジョブを最後に取り掛かる
- 3) 各工程が見込品の仕掛在庫を所有する
- 4) 遅れが発生した場合、決められた作業が終わるまで次の作業を行う
(遅れは次工程へ伝播し、最終的に見込品在庫が減少する)

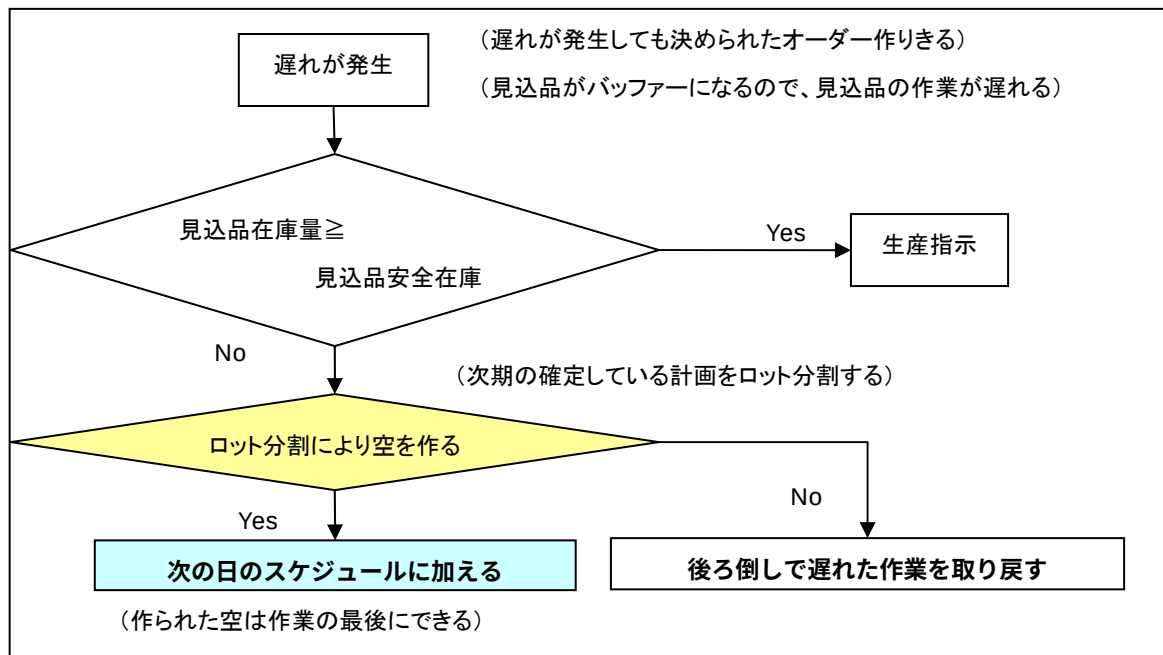


図 2-3 計画作業量に従い生産する場合の遅延取り戻しフロー

しかし、この方法では作業の遅れを取り戻すことはできなかった。問題点として、

- i 第一工程の機械で行われるジョブは分割しても最終ジョブ（見込品）の完了予定時間は変わらない
- ii 作業が遅れたことを受けて再度立案した計画に対しても遅れが発生してしまうため、ほとんど作業の遅れを取り戻すことができない。

が挙げられる。

i から、第二・第三工程で空き時間を作り、見込品在庫の減少分（遅れた分）に取り掛かろうとしても、そのために必要な第一工程で加工された作業を待たなければならぬ。つまり、作業の先行制約によって、遅れの取り戻しを邪魔される。（図 2-4 に、取り戻す遅延がジョブ D におけるサブロットの半分の場合の例を示す）

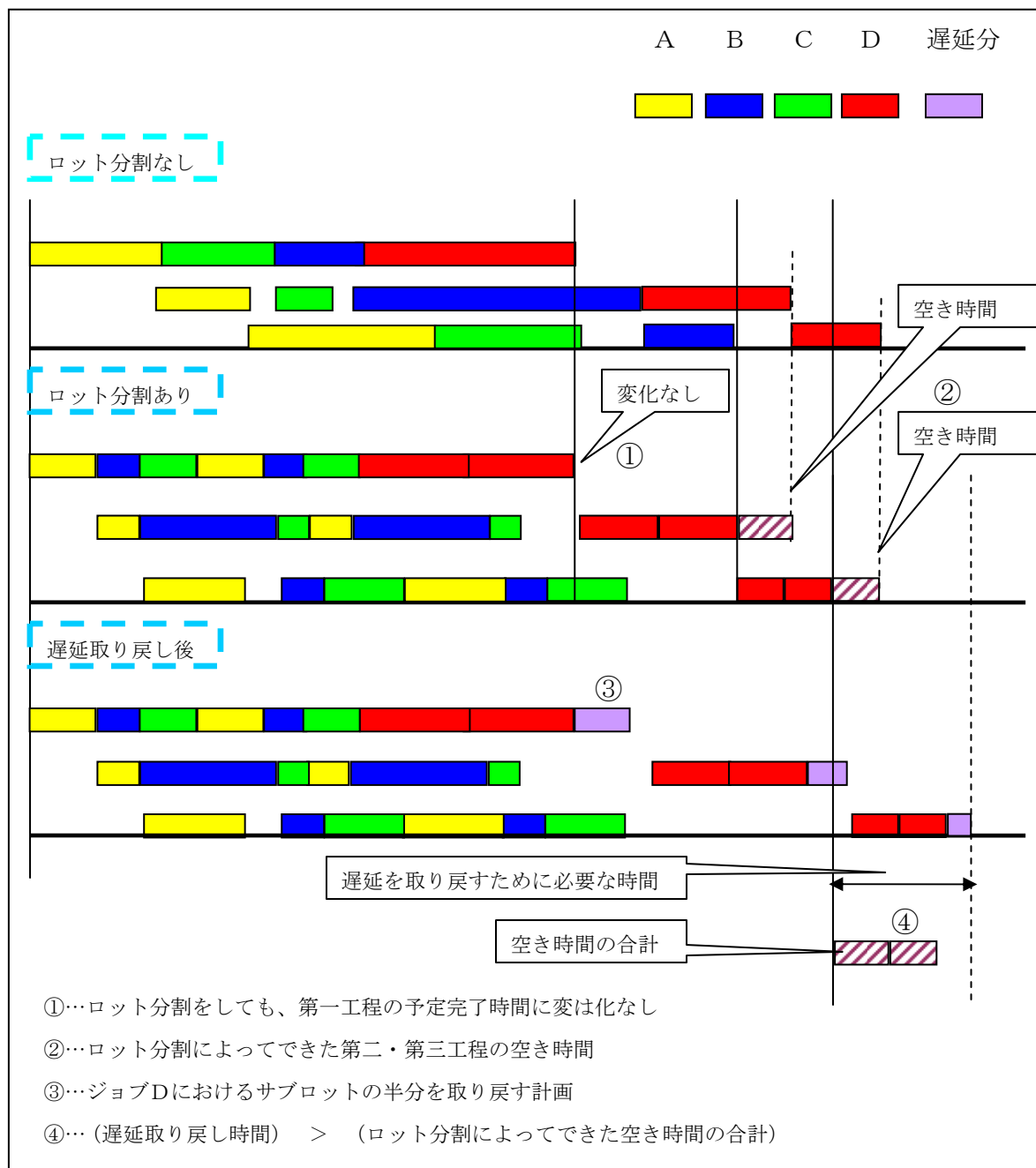


図 2-4 遅延の取り戻し

また ii から、長い期間で考えると遅れの大きさが膨らんでしまい (2.1 より)、初期計画に遅延を付け加える段階で実行可能な計画を立案することが困難となってしまう。

つまり、この方法では、ロット分割・組み合わせで加工時間のばらつきを小さくすることで、加工待ち時間や遊休時間を削減し、メイクスパンを小さくすることは可能であるが、作業の遅れを取り戻すことはできなかった。

これらの問題点を解決するために、本研究では仕掛在庫の減少分を次期の計画に付け加え、それをロット分割・組み合わせすることで、遅れを取り戻すという方法を考える。

2.5 にその方法を詳しく説明する。

2.5 提案手法

本研究における提案手法を、2.4 での方法との違いを中心に説明する。

作業の遅れが発生した場合、2.4 では計画された作業量が完了するまで取り組んだが、今回は計画された時間で作業を切り替えることにした。間に合わなかった作業を取り戻すために、各工程が各ジョブの仕掛在庫を所有することにした。つまり遅れが発生したジョブの、その工程にだけ遅れが発生する。そして、その遅れを吸収することによって減少した各工程における各ジョブの仕掛在庫量を次期の確定した計画にそれぞれ付け加える。当然、それを加えた計画がそれぞれのジョブの納期を守っているものであればその計画にしたがうが、納期を守れないものがあつた場合に、ロット分割・組み合わせを行い、各納期を守りながら遅れを取り戻すことができないかと考えた。この場合、計画時間までに取り組むことができなかった未処理のジョブは、その工程に滞留しているので、作業の先行制約を考慮せずに、時間制約だけを考慮すればよい。(図 2-5、図 2-6、図 2-7)

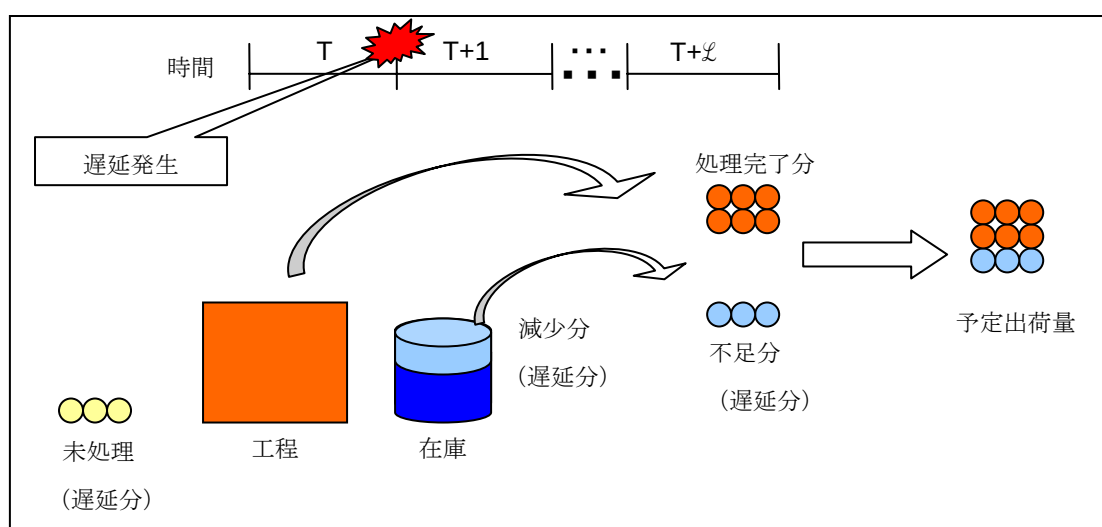


図 2-5

T 期における作業遅延の発生

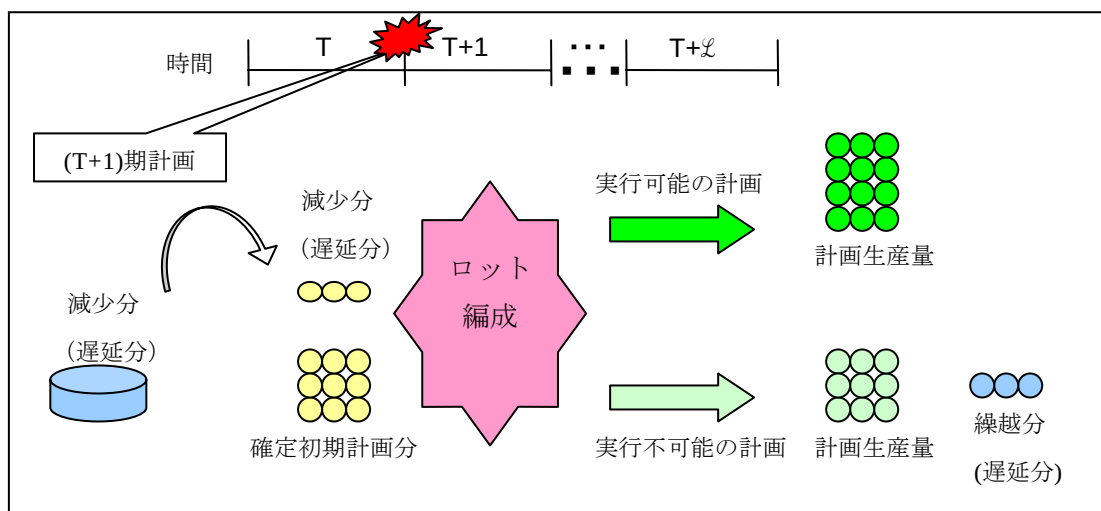


図 2-6 (T+1)期の生産計画

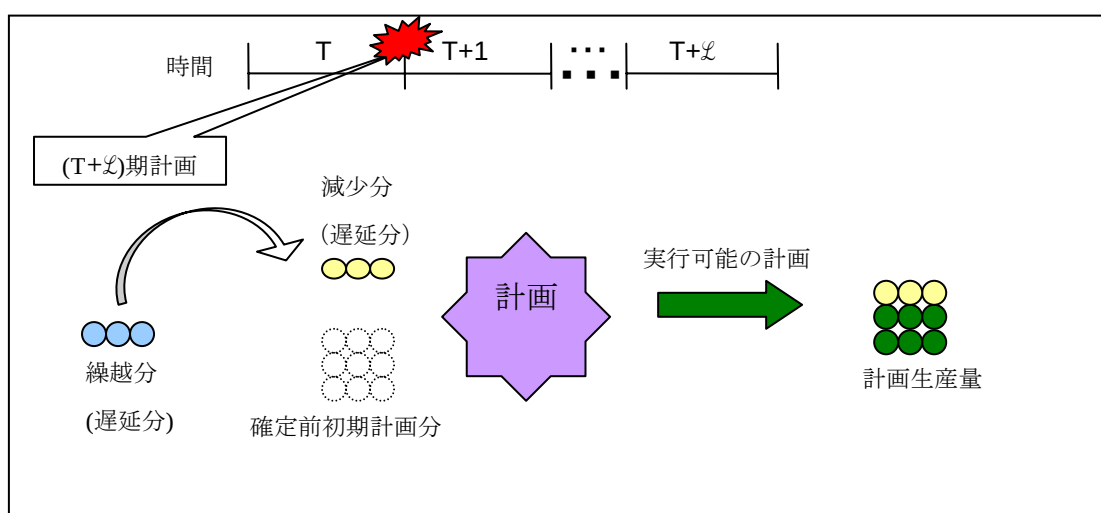


図 2-7 (T+L)期の生産計画

さらにこれが実現すれば、作業環境が見込み受注生産環境でなくても可能となる。以下に条件、図 2-8 にフローを示す。

【条件】

- 1) 各工程が各ジョブの仕掛在庫を所有する
- 2) 遅れが発生した場合、決められた時間で作業を次の作業に切り替える
(遅れ発生した、その工程そのジョブの仕掛在庫が減少する。)

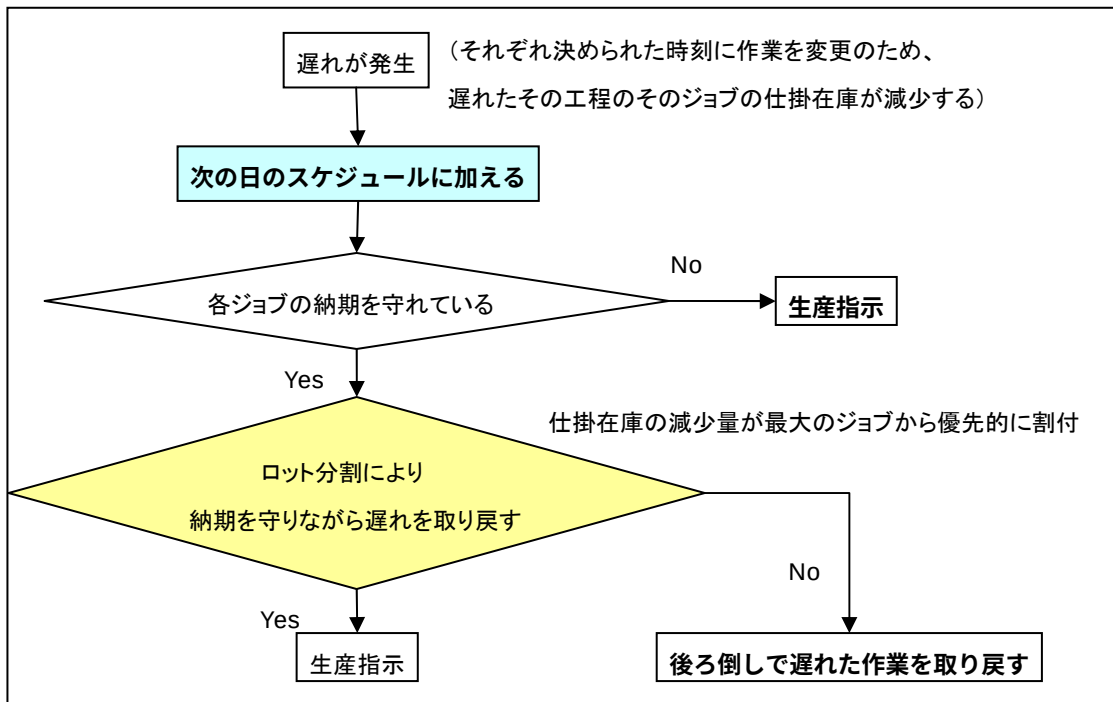


図 2-8 計画時間に従い生産する場合の遅延取り戻しフロー

この提案手法の効果や正当性を検証するために数値実験を行った。その実験を行うために必要なシミュレータを開発した。次の章では開発シミュレータの説明をする。

第3章 シミュレーション

本研究では 2 章で説明した提案手法を数値実験にて評価するため、モデル化しシミュレータを開発した。本章では、シミュレータで表現した作業遅延、在庫、機会損失を説明する。次に、実験に用いたシミュレータの概要を前述した内容をふまえて説明する。

まず、開発したシミュレータで表現した作業遅延、評価に利用した機会損失と在庫について例を挙げながら説明する。

(1) 作業遅延

本研究の実験で用いたシミュレータでは、作業遅延を以下のように表現した。

一期全体で考えた各ジョブに対する各機械の作業時間にたいして遅延を発生させるのではなく、計画で割当てられた作業をするたびに各ジョブに対する各機械で遅延が発生するものとした。

例として、T 期におけるジョブ α に対する機械 β の作業時間が 100 分とした場合を考える。これを 1 個のロットと考え実行すると 100 分の作業を 1 回。また、10 個のロットに分割し、全て不連続に実行すると、10 分の作業が 10 回となる。この二つ作業にそれぞれの平均に対して $\pm 10\%$ を標準偏差とし、作業にばらつきを発生させ（整数）、その値が平均値よりも大きい場合は計画通りに作業が完了したとする。逆に、平均値よりも小さい場合は計画に対して遅れが生じたとした。表 3-1 にその結果を示す。

表 3-1 遅延の現れ方

	予定全作業時間	作業回数	予定単作業時間	平均実作業時間	遅延
A	1000	10	100	976	24
B	1000	100	10	944	56

以上から、本実験の作業遅延はロットを分割して作業する場合の方が、大きく発生することがわかる。

(2) 機会損失

本研究ではロット分割・ロット組み合わせを行う場合と行わない場合の比較として機会損失を取り入れた。本研究における機会損失を以下に説明する。

ロット分割を行わない場合；

T 期に作業に遅延が発生した場合、それを吸収するために仕掛在庫が減少する。しかし、その減少を放っておくと在庫は常に減少し続けてしまい、莫大な量が必要となってしまう。そこで、本研究では在庫の減少分を(T+ $\mathcal{L}$)期の確定前の計画の中に取り込む ($\mathcal{L}$ =リードタイム)。図 3-1 に示す。

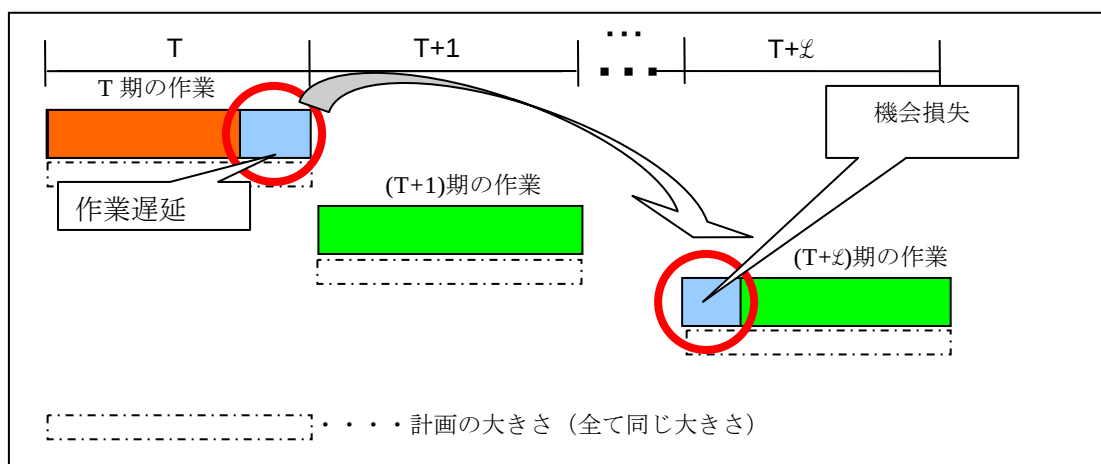


図 3-1 ロット分割を行わない場合の機会損失

ロット分割を行う場合；

T 期に作業の遅延が発生した場合、それを吸収するために仕掛在庫が減少する。その減少量を(T+1)期の確定した計画に付け加え、ロット分割・ロット組み合わせによって取り戻すようにする。しかし、必ずしも遅れを取り戻せるとは限らず、減少分を加えた実行可能な計画が立案できない場合がある。その場合、実行可能な計画が立案できる範囲で遅れを取り戻す。そのため、加えることのできなかった減少量を (T+t)期の確定前の計画の中に取り込む。図 3-2 に示す。

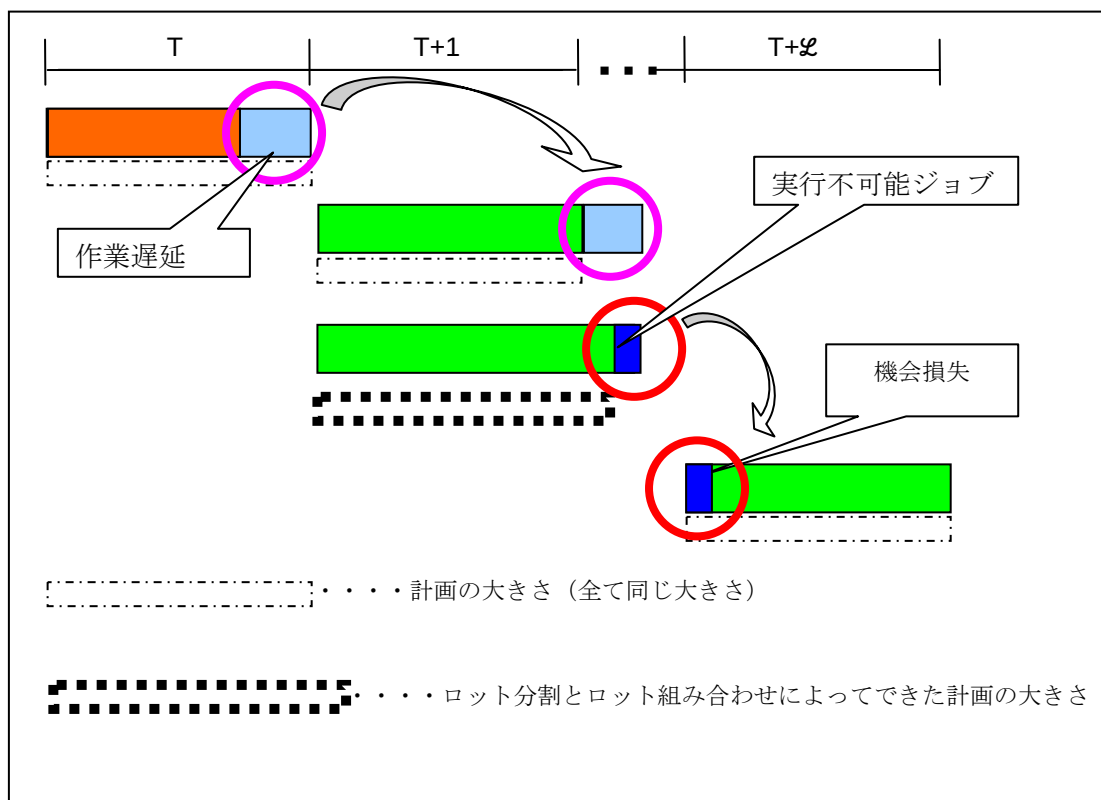


図 3-2 ロット分割を行う場合の機会損失

以上のいずれの場合も、確定前の計画に取り込んだ仕掛在庫減少量を機会損失とする。これは、本来ならばオーダーに対して行えた作業を、遅延作業に割当てたため実行できなかったと考えるからである。

(3) 在庫

本研究の実験で用いたシミュレータでは、在庫の減少を出力する。以下に本研究における在庫変動の特徴と、在庫の位置付けを説明する。

ロット分割を行わない場合；

T 期に作業に遅延が発生した場合、それを吸収するために仕掛在庫が減少する。減少分を発注してから手元に届くまでの L 期かかる。その間、仕掛在庫の減少量が元に戻ることはない。さらに、 L 期間の間も工程では他の作業が続き、その作業に対しても遅延が発生する可能性もある。そして、減少分を取り込んだ $(T+L)$ 期の作業にも遅延は生じる。 $L=2$ の時を例とし、図 3-3 に示す。

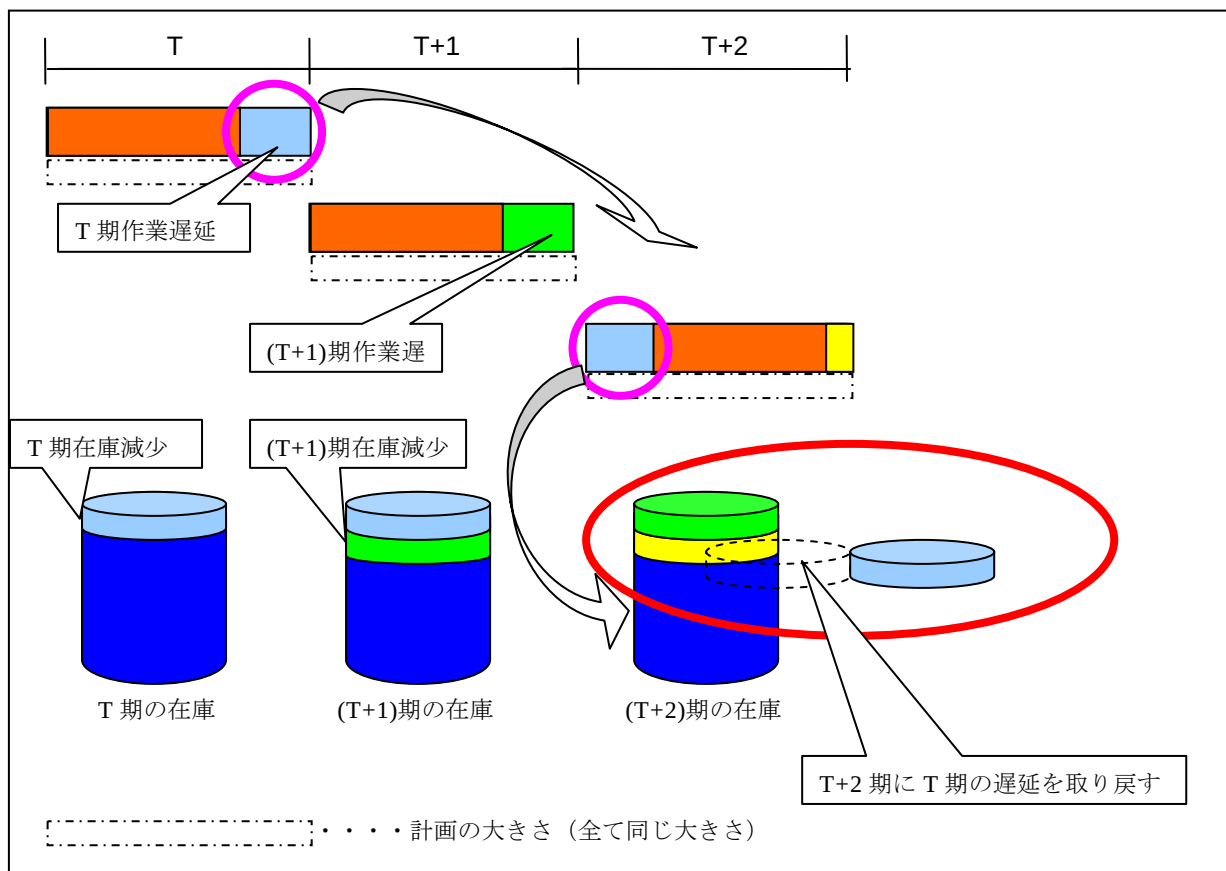


図 3-3 ロット分割を行わない場合の在庫変動 ($L=2$)

ロット分割を行う場合；

T 期に作業に遅延が発生した場合、それを吸収するために仕掛在庫が減少する。ロットの分割と組み合わせによって ($L+1$) 期の確定後の計画に、減少分を付け加えた計画が実行可能な場合は ($L+1$) 期の作業遅延がそのまま仕掛在庫の減少量となる。しかし、実行不可能の場合には機会損失が発生し、ロット分割を行わない場合と同じように在庫の減少が生じる。

図 3-4 に示す。

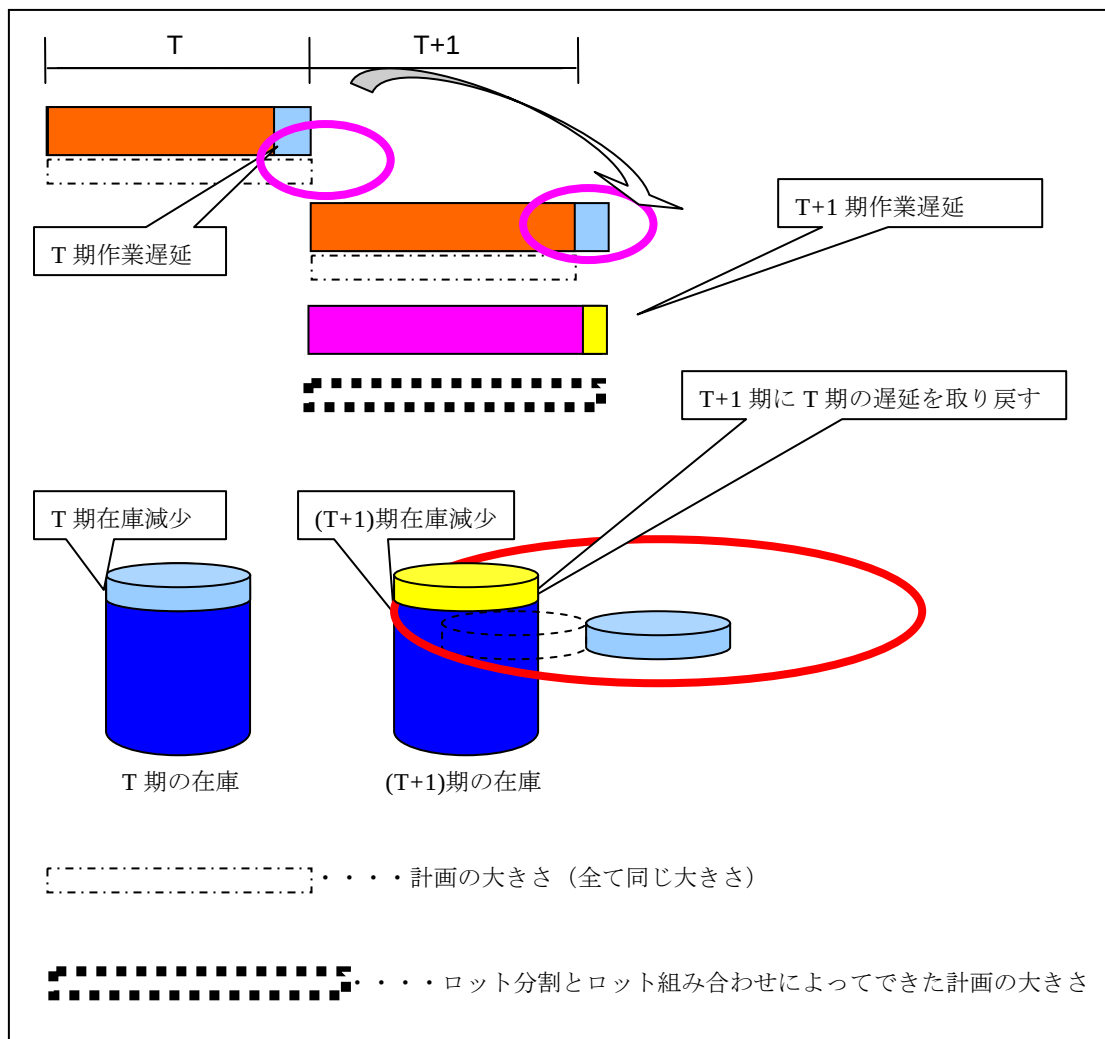


図 3-4 ロット分割を行う場合の在庫変動

また、本研究における在庫の位置付けは、この作業遅延を後工程以降に伝播させないために必要な最小の仕掛在庫量とする。そのため本研究では、1 期分の作業時間以下の安全在庫量が成り立つ場合に、その手法が効果的であるとする。

3.1 シミュレータ概要

本研究で開発したシミュレータの開発環境は「Microsoft Excel 2002 (10.4109.3501) SP-1」に提供されている「Microsoft Visual Basic for Application : Retail 6.3.8863」を用いた。

次にシミュレータ実行の流れをフローチャートで示す。四角形は処理を、ひし形は判断、三分割の四角は定義済み処理を表す。

<入出力フロー>

図 3-5 に示すようにシミュレーション条件入力を行う。その後、シミュレーションが実行され、実行結果出力となる。

シミュレーション条件入力の流れは以下の通りである。

- Step1. 工程数、ジョブ数を入力する
- Step2. 各工程における各ジョブの作業時間と段取り時間を入力する
- Step3. 各ジョブの納期を入力する
- Step4. 作業の遅れの範囲を入力する
- Step5. タブーサーチのタブーリストサイズ、ペナルティー値、試行回数、停止条件（検索回数）を入力する
- Step6. 検証する期間を入力する。

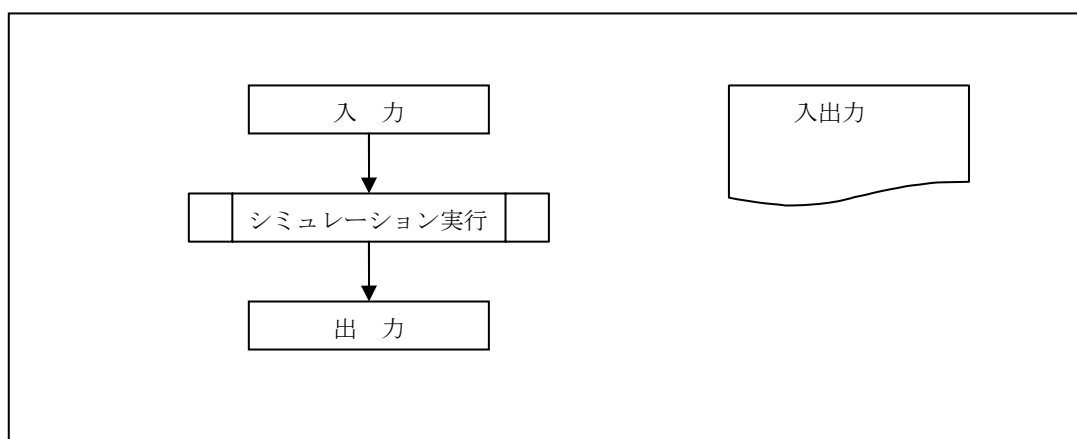


図 3-5 入出力フロー

各条件を入力後、シミュレーションが実行する。そして、シミュレーション終了後、指定した期間内の、在庫の減少量と機会損失量が一期ずつに区切られ出力される。

<実行フロー>

シミュレーション実行中の主な内部の流れは、図 3-6 のようになる。まず前期までの在庫減少量を確認し、処理を行う。次にロット分割をしないロットサイズでスケジューリングする。その計画が全てのジョブの納期を厳守できる実行可能計画でない場合は、ロット分

割、ロット組み合わせの処理をおこないスケジューリングする。その計画でも実行可能と
ならない場合は機会損失の処理を行い、もう一度ロット分割、組み合わせを繰り返す。
実行可能計画を得た後、作業遅延の処理をおこない、在庫の減少を出力する。この処理を、
検討期間を満たすまで繰り返し、シミュレーションを終了する。

図 3-6 で網かけの機会損失、作業遅延、在庫減少は 3 章の最初に説明した処理をおこな
い、ロット分割は 2.3.2 で説明した処理を行う。

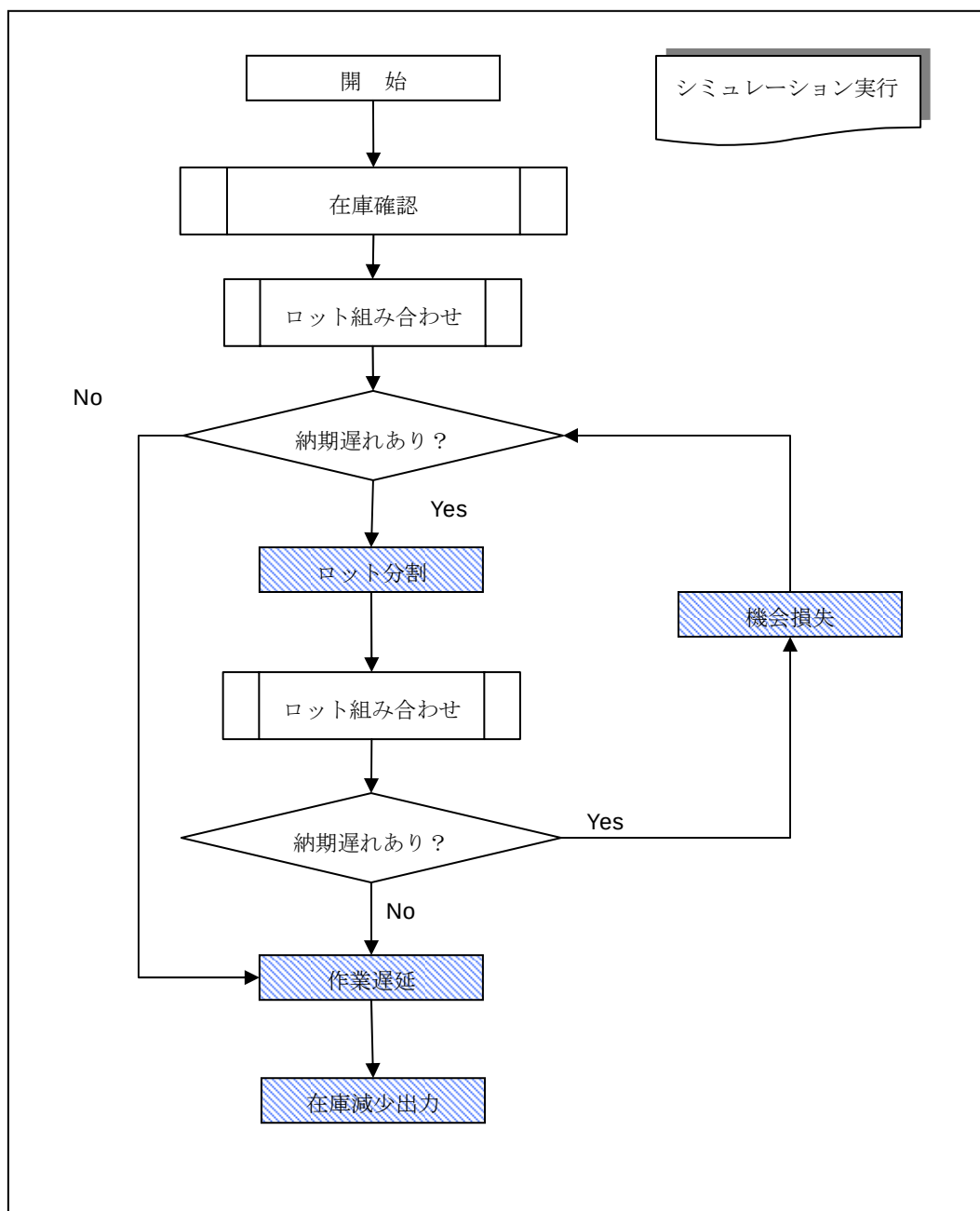


図 3-6 シミュレーション実行フロー

<在庫確認フロー>

在庫確認フローでは図 3-7 に示すように、在庫の減少を確認した後、2.5 で説明した提案手法の、遅延を確定計画に付け加える処理を行う。

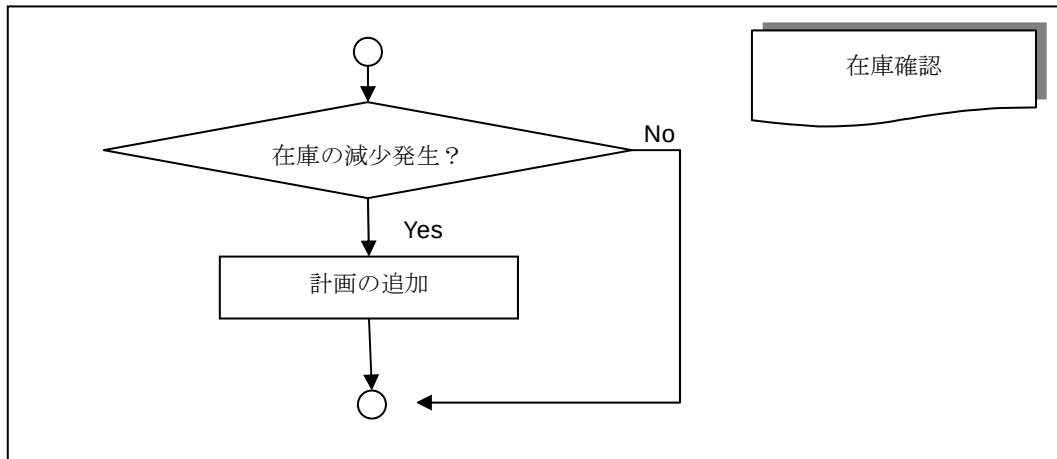


図 3-7 在庫の確認フロー

<ロット組み合わせフロー>

ロット組み合わせフローでは図 3-8 に示すように、ロットの投入順序を変えることによって各ジョブの納期厳守される、実行可能な生産計画を求める処理を行う。しかし、処理を行っても求める計画が得られない場合、各ジョブの作業完了予定時間の、納期に対する遅れの合計を評価値 V と設定する。 V を(3)式に示す。また、それを基にタブーサーチの処理を行う。

$$V = \sum_{i=1}^n \max(0, C_{iN_i} - D_i) \quad \dots \dots \dots (3)$$

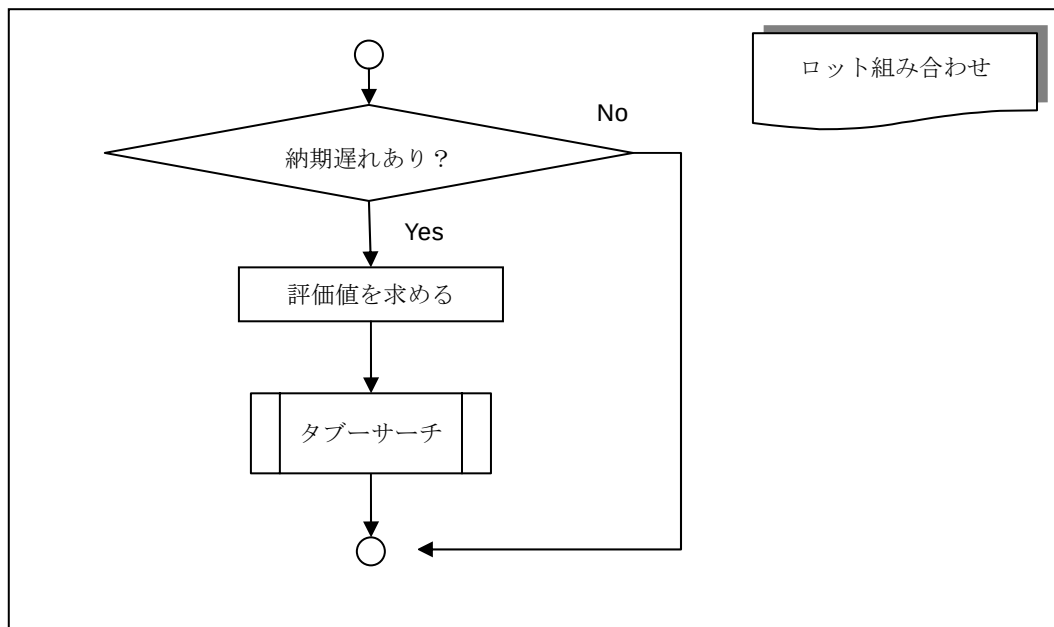


図 3-8 ロット組み合わせフロー

＜タブーサーチフロー＞

この処理の目的は評価値（納期遅れの合計）を 0 にすることである。タブーサーチフローでは図 3-9 に示すように、処理を行う。ここで、本研究では停止条件を最良解が 0、もしくは指定された試行回数を終えた時に作業を終えることとした。

まず最良評価値を求め、次に評価値を得たロットの投入順序を基にロットの入れ替えを行い、その結果から新たな評価値（新評価値）の候補を複数個（＞タブーリストサイズ）作成する。候補の中から最良の解を選択し、その解を得るために行った入れ替えがタブーリストに含まれているかどうか確認する。

タブーリストに含まれる場合は、解が願望水準を満たす時は新評価値が評価値であると同時に最良評価値である。願望水準を満たさない場合は、その解を候補から外し、残った候補から最良の解を選択し処理を行う。また、タブーリストに含まれない場合は、候補の解がそれまでの最良評価値より優れている時に新評価値が評価値であると同時に最良評価値である。優れていない場合は新評価値が評価値であり、最良評価値は不変である。

以上の処理後に評価値を得たロットの入れ替えをタブーリストに加え、リストを更新する。そして、最後に最良評価値が停止条件を満たしていれば作業は終了し、満たさない場合は評価値から新たに処理始める。

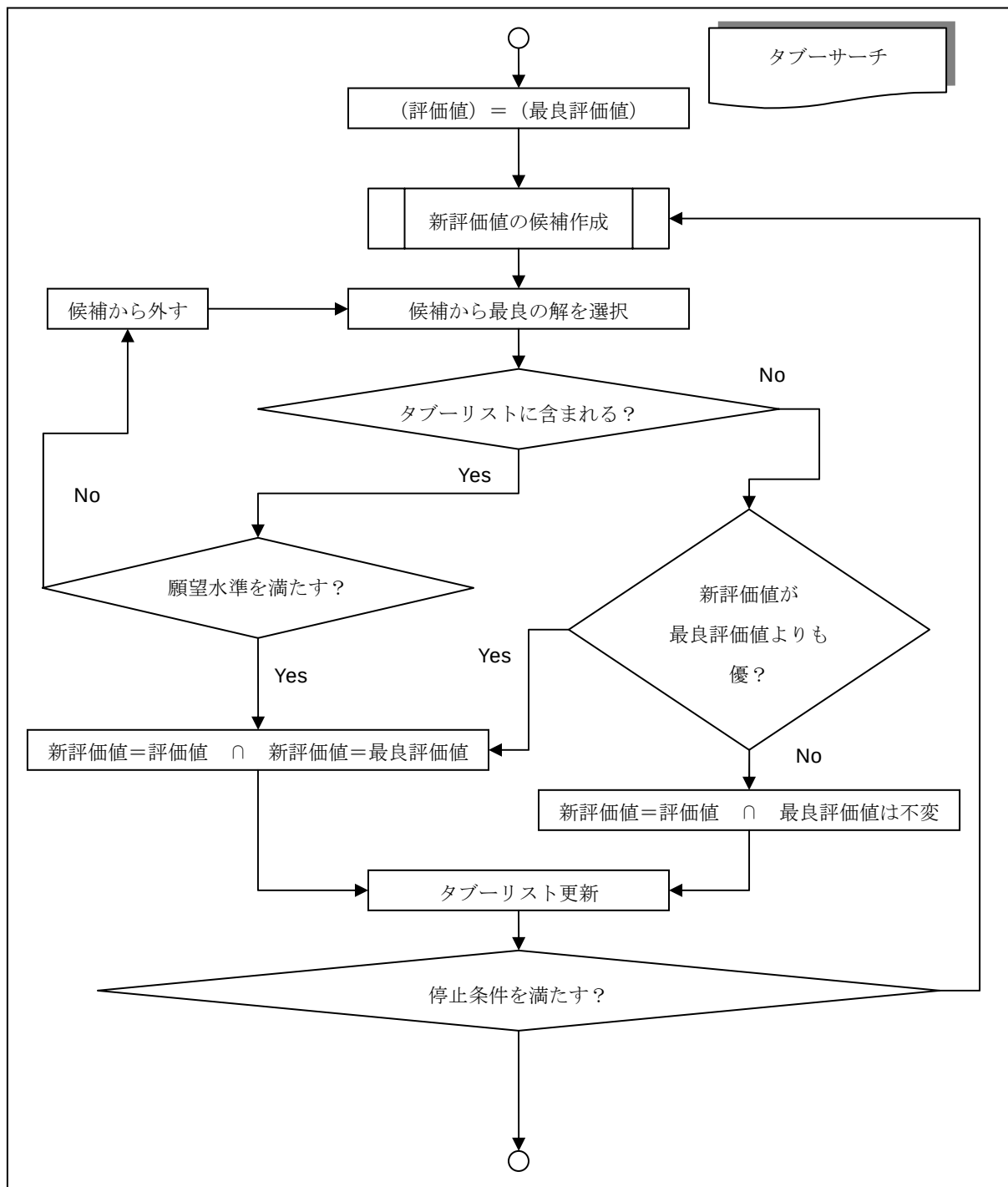


図 3-9 タブーサーチフロー

＜新評価値の候補作成フロー＞

新評価値の候補作成フローでは、2.3.3 で説明したタブーサーチにおける中期記憶と長期記憶の要素を用いる。図 3-10 にそれを示す。

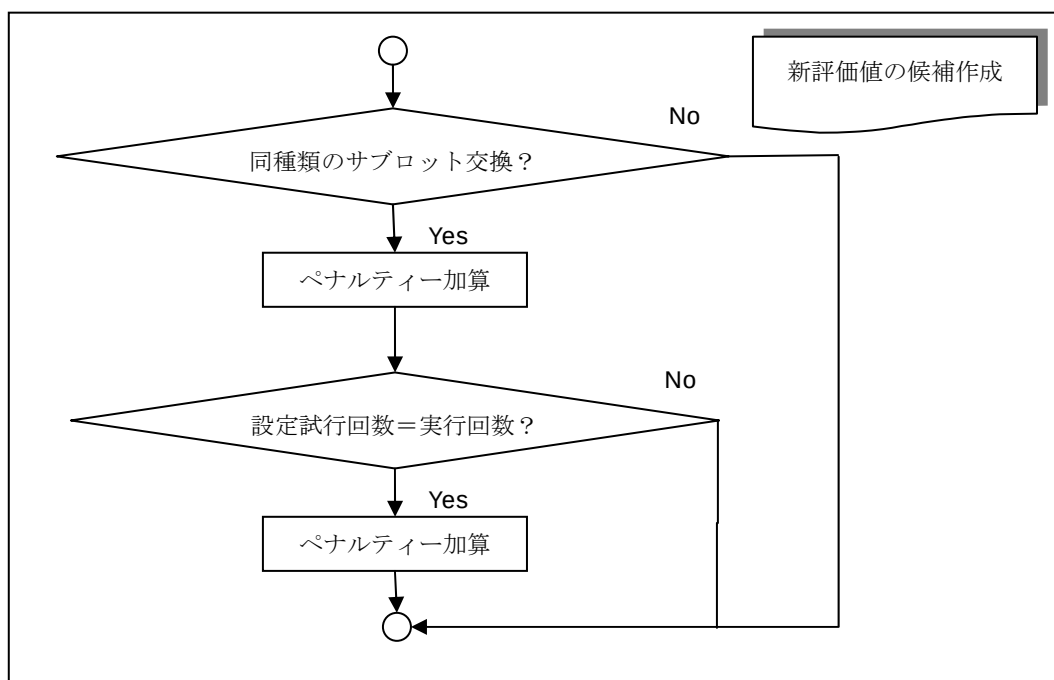


図 3-10 新評価候補の作成フロー

第4章 数値実験

前述したシミュレータを用いて、以下の数値実験を行う。

- ① ロット分割の有り（提案方法）無しの比較
- ② 作業遅延の大小による比較
- ③ 納期余裕の違いによる比較
- ④ 段取り時間の大小による比較
- ⑤ 初期計画の固定と変動による比較

①～⑤の結果から、状況の違いによる提案方法の効果の違いを検証する。また、⑥の結果から、本研究で提案した方法とシミュレータの汎用性の検証を行う。

4.1 実験対象モデル

本実験における対象モデルを、3工程4ジョブの場合を例として図4-1に示す。図では下向き三角形が処理前在庫保管スペースを表し、上向き三角形が処理後在庫保管スペースを表し、四角形が工程を表している。

モデルの条件は以下である。

<条件>

- (1) 生産工程は上流工程より工程1、工程2、工程3とする
- (2) 処理前在庫保管スペースは上流より前在庫1、前在庫2、前在庫3とし、処理後在庫保管スペースを後在庫1、後在庫2、後在庫3とする
- (3) 前在庫と後在庫は、それぞれジョブ(A,B,C,D)に対応する在庫を保有する
- (4) 前在庫から工程へ、また工程から後在庫への運搬時間は、それぞれ工程の生産時間に含まれる
- (5) 後在庫から次工程の前在庫への運搬時間は、工程の段取り時間に含まれる

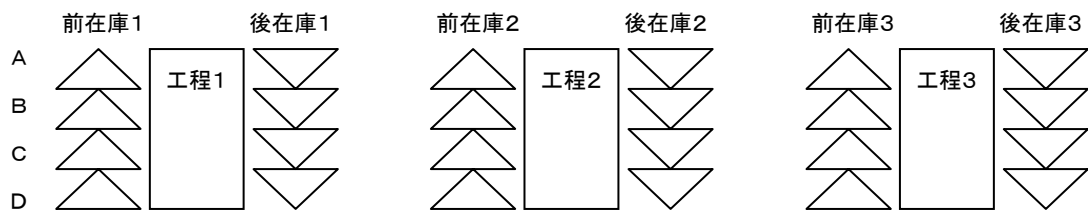


図 4-1 実験対象モデル

各工程では、処理を始める時に、処理前在庫スペースからジョブを引き取り、処理をはじめる。また作業遅延が発生した時、計画に間に合わなかったジョブを作業後在庫スペースからジョブを引き取り、作業が完了したジョブに付け加え、次工程の前在庫へ渡す。

ここで、工程の前後にある二つの在庫（例えば前工程 1 と後工程 1）の関係について説明する。工程で作業遅延が生じた場合、前工程には処理されるはずだったジョブの残りが停滞する。一方、後在庫では処理するはずだった足りないジョブを次工程に移す。つまり、前在庫に停滞するジョブと、後在庫で減少したジョブの値は同じであると考えられ、片方を制御できれば、もう片方も制御できるはずである。そこで、次の 4.2 で説明する評価基準に用いている在庫は、本研究では後在庫に注目した。

4.2 評価基準

次に、全ての実験に共通する評価基準である、機会損失と在庫の説明をする。

<機会損失>

本研究では各ジョブに対する各機械の機会損失の平均値を評価に用いる。3 章での説明ように、確定前の計画に仕掛在庫減少量を取り込んだ時に機会損失が発生したと評価する。そのため、ロットを分割する場合と、分割しない場合では機会損失を求める方法が違う。

ロットを分割しない場合、 $(T+L)$ 期の確定前の計画に仕掛在庫減少量を取り込む以外に作業遅延を取り戻す方法がないので、作業遅延がそのまま機会損失となる。

$$l_t = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n Wb_{ijt} \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$l_t = T \text{ 期の機会損失}$$

$$Wb_{ijt} = J_i \text{ の } M_j \text{ での作業遅れ}$$

また、ロットを分割する場合、ロット組み合わせを行っても実行可能な計画が立案できなかったときにだけ、(T+1) 期の確定後計画に一度付け加えた作業を取り外し、(T+ℓ)期の確定前の計画に取り込まれた作業が機会損失となる。

$$l_t = Db_{ijt} \sum_{j=1}^m \sum_{t=1}^n Wb_{ijt}$$

$$Db_{ijt} = J_i \text{ の } M_j \text{ における納期遅れの有無}$$

$$Db_{ijt} = \begin{cases} 1 & (\text{納期遅れあり}) \\ 0 & (\text{納期遅れなし}) \end{cases}$$

..... (5)

<在庫>

本研究では各仕掛在庫の在庫減少の推移と、最大減少幅（必要とされる最小安全在庫）を評価に用いる。3 章での説明のように、ロットを分割する場合と、分割しない場合では在庫を求める方法が違う。

ロットを分割しない場合、T 期の在庫減少量は、常に(ℓ-1)期間の累積作業遅延が在庫減少となり、確定前の計画に組み込まれたジョブが届く(T+ℓ)期に在庫が増加する。

$$I_{ijT} = I_{ij(T-1)} + \sum_{t=T}^{T+\ell} l_t \quad I_{ij0} = 0 \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$I_{ijT} = T \text{ 期における } J_i \text{ の } M_j \text{ における在庫量}$$

また、ロットを分割する場合、ロット組み合わせを行って実行可能な計画が立案できた場合、T 期の在庫減少量は、T 期に発生した作業遅延である。しかし、実行可能な計画が立案できなかった場合、{T-(ℓ-1)}期から T 期の間、在庫の減少量は累積作業遅延となる。

$$I_{ijt} = Wb_{ijt} + Db \sum_{t=T}^{T+\ell+1} l_t \quad I_{ij0} = 0$$

$$Db_{ijt} = \begin{cases} 1 & (\text{納期遅れあり}) \\ 0 & (\text{納期遅れなし}) \end{cases} \quad \dots \dots \dots (7)$$

また、本研究におけるシミュレーション実験では初期在庫を無限と考えている。そして、実験の結果から在庫の減少幅を求め、その値からシステムを円滑に実行できる必要最小限の安全在庫を求める。

4.3 実験条件

すべての実験における共通の条件は以下の通りである。

・条件

- (1) 機械 3 台、ジョブを 4 とする
- (2) シミュレーション回数：100 回とする
- (3) 段取り替え時間の遅れは考慮しない
- (4) 作業遅延は計画の計画作業時間を平均とし、さらに標準偏差を決め、ばらつきをあたえ整数を求め、平均よりも少ない場合にその分遅延が発生したとする
- (5) 初期計画は 3 期後まで確定しているものとし、遅延を初期計画に発注して手元に届くまでのリードタイムを 4 期 ($L=4$) とする
- (6) タブーサーチのパラメータ

タブーリストサイズ： $k=4$

候補リストサイズ： $|V|=5$

中間記憶ペナルティ値： $\alpha=10$

長期記憶ペナルティ値： $\beta=10$

タブーサーチ試行回数： $h=1000$

停止条件： $(\text{評価値})=0$ または $h=1000$

とする

条件 (2) については、初期削除期間として 50 期分のシミュレーションを実行の後評価を行った。また、条件 (6) については、実験ごとに値の妥当性を示す。

4.4 実験 I

<実験目的>

実験 I では本研究で提案する手法の有効性を検証する。比較方法として、提案するロットの分割・組み合わせを行う場合と、行わない場合を以下の実験条件で比較する。

<実験条件>

- ・ 各機械で行われる各ジョブの作業時間、段取り替え時間、納期を表 4-1 に示す
(ロット分割を行わずに各ジョブの最終工程の納期余裕の合計が 50)
- ・ 需要が一定で、初期立案は常に固定
- ・ 作業遅延を求めるための標準偏差を $(\text{計画作業時間}) \times 0.2$ とした。

表 4-1 実験 I、生産計画

	加工時間			段取り替え時間			納期
	機械 1	機械 2	機械 3	機械 1	機械 2	機械 3	
A	28	18	18	2	2	2	120
B	14	48	18	2	2	2	120
C	22	10	18	2	2	2	140
D	48	18	28	2	2	2	180

<TS の収束>

図 4-1 に、4.3 の実験条件 (6) に示した条件で実験 I を実行した一例の収束状況を表した。

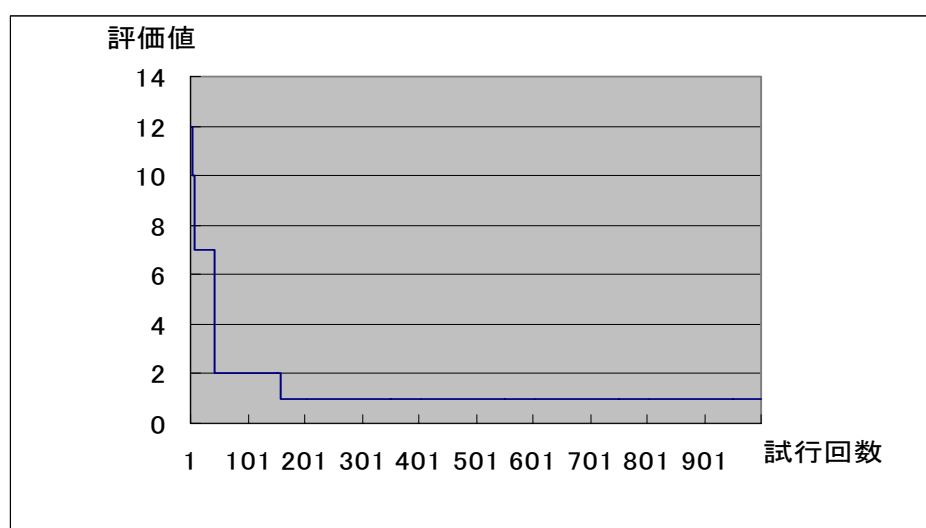


図 4-1 実験 I における TS の収束

<実験結果>

実験結果より、機会損失と在庫減少を表 4-2 および表 4-3 に示す。

表 4-2 実験 I ロット分割なし

	安全在庫			機会損失		
	機械1	機械2	機械3	機械1	機械2	機械3
A	15	8	14	217	149	199
B	22	23	22	504	503	508
C	11	6	10	175	89	136
D	21	11	14	379	250	283
	合計	176		合計	3392	

表 4-3 実験 I ロット分割あり

	安全在庫			機会損失		
	機械1	機械2	機械3	機械1	機械2	機械3
A	12	0	6	12	4	6
B	0	23	4	4	22	8
C	0	0	0	6	3	5
D	50	0	11	14	4	6
	合計	106		合計	94	

<実験考察>

提案するロットの分割と組み合わせを行う場合の方が、必要最小限の安全在庫は少ない量に制御でき、機会損失もロット分割を行わない場合よりも大幅に減らすことができた。

これは、分割なしで立案した初期計画の遊休時間や作業待ち時間を、作業遅延によって発生した在庫の減少の取り戻しに割当てることができたことがわかる。

また、各工程の各ジョブに対する安全在庫量は、初期計画の各工程の各ジョブに対する作業時間よりも少なく制御できたことから、提案手法が有効であることがわかる。

4.5 実験Ⅱ

<実験目的>

実験Ⅱでは、提案手法がどの程度の遅れにまで対応できるかを検証する。方法として、作業遅延を求める標準偏差を変化させた時、在庫減少や機会損失にどのような影響をあたえるか確認する。

<実験条件>

- ・ 実験Ⅰと同様各機械で行われる各ジョブの作業時間、段取り替え時間、納期は表 4-1 と同様である。
- ・ 初期計画は固定
- ・ 作業遅延を求めるための標準偏差を以下のようにする
 - ① (計画作業時間) $\times 0.2$ ・・・作業遅延中
 - ② (計画作業時間) $\times 0.1$ ・・・作業遅延小
 - ③ (計画作業時間) $\times 0.3$ ・・・作業遅延大

<TSの収束>

図 4-2 に、4.3 の実験条件(6)に示した条件で実験Ⅱを実行した一例の収束状況を表した。

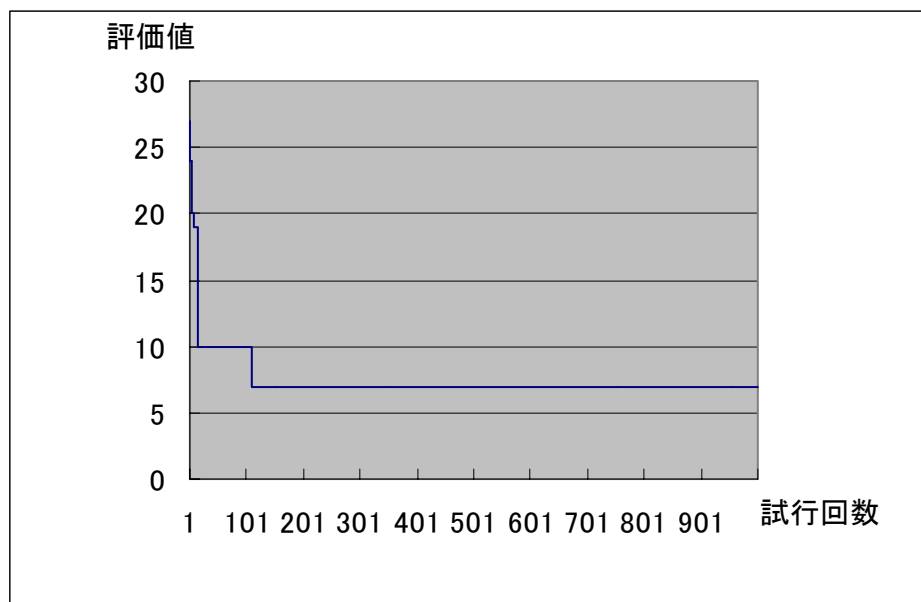


図 4-2 実験ⅡにおけるTSの収束

<実験結果>

実験結果より、機会損失と在庫減少を表 4-4 および表 4-5 に示す。

表 4-4 実験Ⅱ 作業遅延小

	安全在庫			機会損失		
	機械1	機械2	機械3	機械1	機械2	機械3
A	10	3	4	40	0	0
B	4	14	4	0	48	0
C	5	2	4	0	0	0
D	16	3	10	32	0	20
	合計	79		合計	140	

表 4.5 実験Ⅱ 作業遅延大

	安全在庫			機会損失		
	機械1	機械2	機械3	機械1	機械2	機械3
A	25	15	22	110	42	126
B	19	39	22	113	295	69
C	16	4	8	15	0	6
D	36	8	16	185	6	47
	合計	231		合計	1014	

作業遅延中の結果は実験Ⅰに用いた、表 4-3 と同様である。

<実験考察>

結果より、作業遅延が大きくなるにしたがって、必要な安全在庫量と機会損失の合計は大きくなっていることが分かる。

安全在庫は、遅延が発生した瞬間にそれを吸収するために定義したもののなので、遅延の幅が大きくなることと比例して大きくなる。また、遅延が大きくなると、確定計画に付け加える（在庫減少）量が大きくなり、ロットの分割と組み合わせを行っても実行可能な計画が立案できなくなってしまう、結果として機会損失を大きくしてしまうことが分かる。

4.6 実験Ⅲ

<実験目的>

実験Ⅲでは、初期生産計画の納期余裕大小が異なる場合、どのような影響が起こるか検証する。方法として、ロットを分割せずに、組み合わせる中で各ジョブの納期を守り、かつメイクスパンが一番小さい時の納期余裕を求め、その余裕の値に変化を与える。

<実験条件>

- ・ 納期余裕を以下のように変化させる
 - ① 納期余裕=50 (表 4-1 と同様)
 - ② 納期余裕=25 (表 4-6 に示す)
 - ③ 納期余裕=100 (表 4-7 に示す)
- ②と③は共に (A,B,C,D) の投入順序の時に、納期余裕の合計がそれぞれ 25 と 100 である
- ・ 作業遅延を求めるための標準偏差を (計画作業時間)×0.2
- ・ 初期計画は固定

表 4-6 納期余裕=25 の生産計画

	加工時間			段取り替え時間			納期
	機械 1	機械 2	機械 3	機械 1	機械 2	機械 3	
A	30	28	36	2	2	2	120
B	20	40	14	2	2	2	120
C	24	10	18	2	2	2	140
D	28	26	29	2	2	2	180

表 4-7 納期余裕=100 の生産計画

	加工時間			段取り替え時間			納期
	機械 1	機械 2	機械 3	機械 1	機械 2	機械 3	
A	25	15	27	2	2	2	120
B	22	19	30	2	2	2	120
C	15	28	21	2	2	2	140
D	20	20	24	2	2	2	180

< T S の収束 >

図 4-3 に、4.3 の実験条件 (6) に示した条件で実験Ⅲを実行した一例の収束状況を表した。

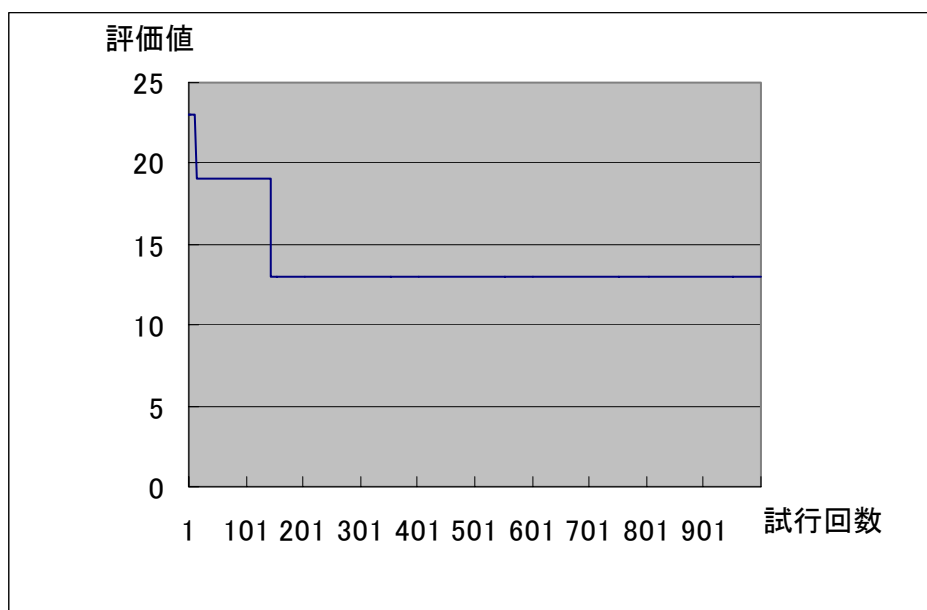


図 4-3 実験Ⅲにおける T S の収束

< 実験結果 >

実験結果より、機会損失と在庫減少を表 4-8 および表 4-9 に示す。

表 4-8 実験Ⅲ 納期余裕小

	安全在庫			機会損失		
	機械1	機械2	機械3	機械1	機械2	機械3
A	19	10	14	62	14	29
B	10	16	4	17	27	0
C	10	4	8	17	0	15
D	12	10	12	11	5	12
合計	129			合計	209	

表 4-9 実験Ⅲ 納期余裕大

	安全在庫			機会損失		
	機械1	機械2	機械3	機械1	機械2	機械3
A	6	4	6	0	0	0
B	5	5	6	0	0	0
C	4	7	6	0	0	0
D	5	5	6	0	0	0
	合計	65		合計	0	

<実験考察>

結果より、初期計画における納期余裕が大きくなるにともない、安全在庫は小さくなり機会損失も小さくなることがわかる。

機会損失が小さくなる要因は、納期余裕が大きい時は 2.3.1 の式 (2) で説明したロット分割回数が大きくなり、余裕が小さい時に比べて、初期計画の遊休時間や作業待ち時間を小さくすることができるので、発生した作業遅延を次期の確定計画に付け加えた計画が実行可能になるからである。

また、在庫は 4.2 の式 (6)、式 (7) で説明したように、遅延を付け加えた計画が実行可能の場合、在庫減少量は作業遅延そのものになる。つまり、納期余裕が大きい場合は実行可能の計画が立案されることが多いので、必要最小限の安全在庫量が小さくなることがわかる。

4.7 実験Ⅳ

<実験目的>

実験Ⅳでは、段取り替え時間の大小によってどのような変化が起こるか検証する。方法として段取り替えの時間を変化させ、それに合わせて各機械に対する各ジョブの計画作業時間も変化させ、(段取り替え時間)+(作業時間) を一定にする。

<実験条件>

- ・ 段取り替え時間を以下のように変化させる
 - ① 段取り替え時間＝小 (表 4-1 と同様)
 - ② 段取り替え時間＝中 (表 4-4 に示す)
 - ③ 段取り替え時間＝大 (表 4-5 に示す)
- ・ どの場合も、加工時間と段取り替え時間の合計が一定である
(例 機械 1 のジョブ A は常に 30)
- ・ 納期余裕＝50
- ・ 作業遅延を求めるための標準偏差を (計画作業時間)×0.2
- ・ 初期計画は固定

表 4-10 段取り替え時間中

	加工時間			段取り替え時間			納期
	機械 1	機械 2	機械 3	機械 1	機械 2	機械 3	
A	25	15	25	5	5	5	120
B	14	48	18	2	2	2	120
C	22	10	18	2	2	2	140
D	45	15	25	5	5	5	180

表 4-11 段取り替え時間大

	加工時間			段取り替え時間			納期
	機械 1	機械 2	機械 3	機械 1	機械 2	機械 3	
A	20	10	20	10	10	10	120
B	10	44	14	6	6	6	120
C	22	10	18	2	2	2	140
D	40	10	10	10	10	10	180

＜TSの収束＞

図 4-4 に、4.3 の実験条件（6）に示した条件で実験Ⅲを実行した一例の収束状況を表した。

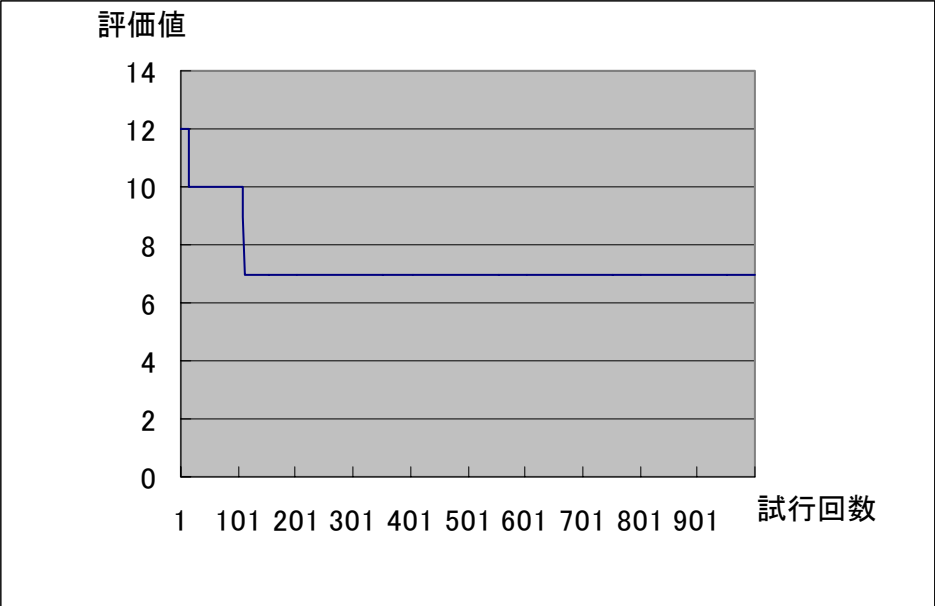


図 4-4 実験ⅣにおけるTSの収束

＜実験結果＞

実験結果より、機会損失と在庫減少を表 4-12 および表 4-13 に示す。

表 4-12 実験Ⅳ 段取り時間中

	安全在庫			機会損失		
	機械1	機械2	機械3	機械1	機械2	機械3
A	15	3	8	35	0	17
B	6	18	6	5	80	12
C	11	3	8	45	0	13
D	61	3	5	156	0	0
合計		147		合計	365	

表 4-13 実験Ⅴ 段取り時間大

	安全在庫			機会損失		
	機械1	機械2	機械3	機械1	機械2	機械3
A	25	8	18	78	8	28
B	8	46	16	10	99	17
C	26	4	9	41	0	3
D	34	18	14	105	14	42
	合計	226		合計	445	

段取り時間小の結果は表 4-3 と同様である。

<実験考察>

結果より、段取り替え時間が大きくなるにつれて必要な安全在庫は大きくなり、機会損失も大きくなることが分かった。

機会損失が大きくなってしまいう要因は、段取り替え時間が大きい時は 2.3.1 で説明したロット分割回数が小さくなり、段取り替え時間が小さい時に比べて、初期計画の遊休時間や作業待ち時間を小さくすることが困難となってしまう、発生した作業遅延を次期の確定計画に付け加えた計画が実行可能でなくなるためだと考えられる。

また、在庫は 4.2 の式 (6)、式 (7) で説明したように、遅延を付け加えた計画が実行可能ではない場合の在庫減少量は、 L (リードタイム) 期分の累積作業遅延となってしまう。つまり、実行可能の計画が立案されないことで、必要最小限の安全在庫量は大きくなってしまふことがわかる。

4.8 実験Ⅴ

<実験目的>

実験Ⅴでは、初期計画が毎回変化した時の影響を検証する。方法として、納期余裕が全て等しく、かつ各機械に対する各ジョブの計画作業時間が等しくない計画を準備し、その中から一つ選択する。

<実験条件>

- ・ 初期計画を変動させる（ただし、すべて納期余裕＝50）
- ・ 作業遅延を求めるための標準偏差を $(\text{計画作業時間}) \times 0.2$

<TSの収束>

図 4-5 に、4.3 の実験条件（6）に示した条件で実験Ⅲを実行した一例の収束状況を表した。

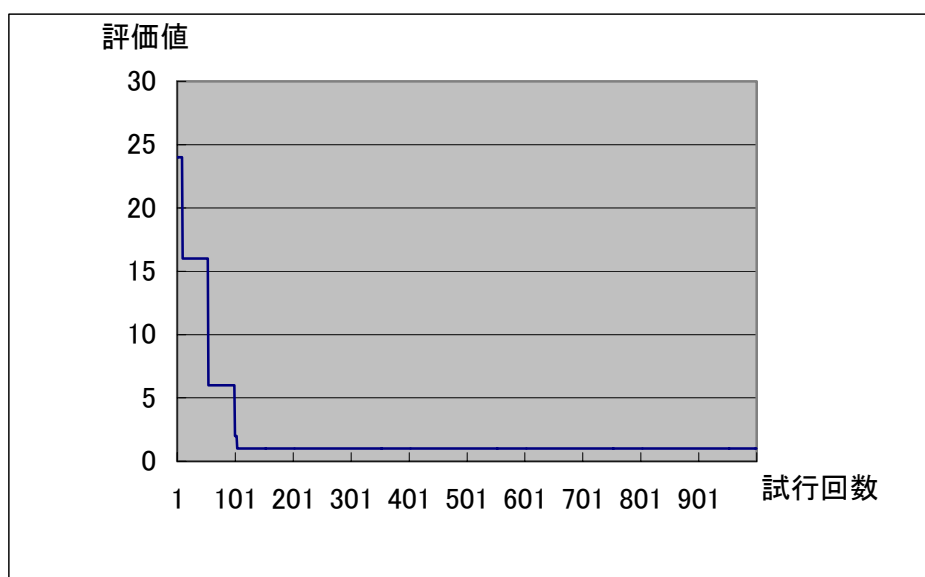


図 4-5 実験ⅤにおけるTSの収束

<実験結果>

実験結果より、機会損失と在庫減少を表 4-15 および表 4-16 に示す。

表 4-15 実験Ⅴ 計画変更・ロット分割なし

	安全在庫			機会損失		
	機械1	機械2	機械3	機械1	機械2	機械3
A	21	14	16	213	146	160
B	13	17	14	148	150	158
C	11	13	10	140	140	113
D	21	27	17	176	187	166
	合計	194		合計	1897	

表 4-16 実験Ⅴ 計画変更・ロット分割あり

	安全在庫			機会損失		
	機械1	機械2	機械3	機械1	機械2	機械3
A	13	11	12	64	25	21
B	11	18	14	36	46	44
C	15	10	8	45	12	22
D	14	18	16	28	56	35
	合計	160		合計	434	

<実験考察>

実験結果より、初期計画を固定せず、変更を繰り返す状況でも、固定の時と同じように、提案するロットの分割と組み合わせを行う場合の方が、必要最小限の安全在庫は少ない量に制御でき、機会損失もロット分割を行わない場合よりも大幅に減らすことができた。

4.9 考察

実験Ⅰから実験Ⅴまでの結果を表 4-17 に示す。なお、各実験において、提案するロットの分割と組み合わせを行わない場合の結果も示す。

表の評価値は、

機会損失・・・ロットの分割と組み合わせをした場合、しない場合の差分と削減率

安全在庫・・・ロットの分割と組み合わせをした場合、しない場合の差分と削減率とする。

表 4-17 実験結果一覧

条件						評価		評価値(差分)		評価値(削減率)	
実験番号	ロット分割	納期余裕	段取時間	初期計画	標準偏差	機会損失合計	安全在庫合計	機会損失	安全在庫	機会損失	安全在庫
Ⅰ	あり	50	小	固定	平均×0.2	106	94				
	なし	50	小	固定	平均×0.2	3392	176	3286	82	96.88%	46.59%
Ⅱ	あり	50	小	固定	平均×0.1	79	35				
	なし	50	小	固定	平均×0.1	2986	146	2907	111	97.35%	76.03%
	あり	50	小	固定	平均×0.2	106	94				
	なし	50	小	固定	平均×0.2	3392	176	3286	82	96.88%	46.59%
	あり	50	小	固定	平均×0.3	1014	231				
	なし	50	小	固定	平均×0.3	4055	217	3041	-14	74.99%	-6.45%
Ⅲ	あり	25	小	固定	平均×0.2	209	129				
	なし	25	小	固定	平均×0.2	1774	157	1565	28	88.22%	17.83%
	あり	50	小	固定	平均×0.2	106	94				
	なし	50	小	固定	平均×0.2	3392	176	3286	82	96.88%	46.59%
	あり	100	小	固定	平均×0.2	0	65				
	なし	100	小	固定	平均×0.2	4166	195	4166	130	100.00%	66.67%
Ⅳ	あり	50	小	固定	平均×0.2	106	94				
	なし	50	小	固定	平均×0.2	3392	176	3286	82	96.88%	46.59%
	あり	50	中	固定	平均×0.2	365	147				
	なし	50	中	固定	平均×0.2	1745	141	1380	-6	79.08%	-4.26%
	あり	50	大	固定	平均×0.2	445	226				
	なし	50	大	固定	平均×0.2	1511	119	1066	-107	70.55%	-89.92%
Ⅴ	あり	50	中	変更	平均×0.2	434	160				
	なし	50	中	変更	平均×0.2	1897	194	1463	34	77.12%	17.53%

以上のことから次のことがわかる。

- ・ 提案するロットの分割と組み合わせを行う方が、需要が固定していても変動していても、機会損失と安全在庫を制御できる。
- ・ 評価値が負の値は、ロットの分割と組み合わせを実行しない方が有効であることから、作業のばらつきが多い場合と段取り替え時間が作業時間に対して大きい場合は、提案手法は効果がない。

第5章 結論

本研究では、各ジョブに対する各工程の作業遅延を考慮した環境で、各ジョブの納期が異なるフローショップスケジュール問題を、作業遅延をどのように取り戻すかの提案を中心に行った。また、提案する方法を検証するためにシミュレータを構築し、シミュレーション実験を行った。

提案手法として、遅延発生により減少した在庫量を次期の確定計画に付け加えた後、ロット分割とロット組み合わせを行うことで遊休時間や作業待ち時間を減らし、遅延を取り戻し且つ各ジョブの納期を厳守できる計画を立案する方法を提案した。また、ロット組み合わせでは大規模組み合わせ問題となり、現実的な時間ないで解を得ることができないので、タブーサーチを適用して問題を解いた。

また、シミュレーション実験から以下の確認ができた。

- ・提案する方法はロット分割をしない方法よりも、在庫量と機会損失量を制御できる
- ・提案方法は、作業のばらつきが小さく、初期計画の納期余裕が大きく、段取り時間が作業時間に対して小さい時に、効果が大きくなる
- ・提案手法では、初期計画が固定されない需要変動がある場合でも効果がある

本研究によって、生産現場における遅延の取り戻す計画の立案方法を、新たな形のひとつとして示すことができた。

参考文献

- [1] 福田好朗 圓川隆夫 黒田充 編
生産管理の辞典 朝倉書店, 1999
- [2] サディック・M・サイト ハビブ・ヨゼフ 著
組合せ最適化アルゴリズムの最新手法—基礎から工学応用まで—
丸善株式会社
- [3] 大野勝久 田村隆善 伊藤崇博 著
Excelによるシステム最適化 コロナ社
- [4] 金指正和 三谷崇 著
ジョブのロット分割を考慮したフローショップスケジューリング問題の解法
日本経営工学会論文誌 Vol.53 No3, 2002

謝辞

本研究全般にご指導くださり、2年間に渡りご教授頂いた福田好朗教授に心より深く感謝いたします。また、研究の副査を担当して頂いた若山邦紘教授に深く感謝致します。そして、研究を進めるにあたり、適切な助言を頂きました福田研究室の先輩、同輩、後輩の諸氏に深く感謝致します。最後に、大学4年間、そして大学院2年間の学生生活を支えてくれた両親に深く感謝致します。