

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	受注生産型生産管理方式のモデリングに関する研究
Title(English)	
著者(和文)	和田雅宏
Author(English)	
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第3887号, 授与年月日:1998年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第3887号, Conferred date:1998/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

学位論文

平成9年度

受注生産型生産管理方式の
モデリングに関する研究

東京工業大学
社会理工学研究科
経営工学専攻
96D14080

和田 雅宏

目次

第1章 序

1. 1 本論の背景	4
1. 2 スケジューリング問題の研究課題	5
1. 3 本論の目的	7
1. 4 論文の構成	8

第2章 生産組み合わせ制約のある多品種変量受注生産方式の設計

2. 1 はじめに	10
2. 2 想定する生産システムのモデル化	12
2. 2. 1 生産量の決定	
2. 2. 2 見込み生産の場合の生産量	
2. 2. 3 生産計画期間	
2. 2. 4 生産システムの評価尺度	
(1) 在庫品回転率	
(2) 納期余裕	
(3) 副生品量	
(4) 品種組み合わせ効率	
2. 3 実受注データによるシミュレーション	19
2. 3. 1 解析データの背景	
2. 3. 2 生産計画	
2. 3. 3 実験	
2. 4 考察	27
2. 5 結論	28

第3章 発注納期より確定納期が遅れる取引の push/pull 型生産在庫	
3. 1 はじめに	29
3. 2 問題のモデリングと定式化	31
3. 2. 1 想定環境	
3. 2. 2 push 型生産在庫	
3. 2. 3 pull 型生産在庫	
3. 2. 4 push/pull 型生産在庫比較のスケーリング	
3. 2. 5 不良品考慮とサービス水準	
3. 3 生産在庫シミュレーション	34
3. 3. 1 需要と生産のモデル	
3. 3. 2 需要に依存する部分	
3. 3. 3 リードタイム L と納期延長の関係	
3. 4 push/pull 型適性判定の一般化	37
3. 4. 1 判定尺度	
3. 4. 2 サービス水準の影響	
3. 5 生産チャンス限定と多品種生産	40
3. 5. 1 生産チャンスを考える理由	
3. 5. 2 断続生産の影響	
3. 5. 3 多品種生産への適用	
3. 6 結 論	44
第4章 多工程小量生産のための再利用型日程計画	
4. 1 はじめに	46
4. 2 多工程生産事例	47
4. 2. 1 工程概要	
4. 2. 2 スケジュールリング	
4. 2. 2. 1 スケジュールリングの目的	
4. 2. 2. 2 スケジュールリング法	

4. 2. 3	現場実施	
4. 2. 3. 1	これまでの作業指示	
4. 2. 3. 2	試行	
4. 3	考察	52
4. 3. 1	再利用型日程計画について	
4. 3. 1. 1	中日程計画と小日程計画の順序	
4. 3. 1. 2	緩衝機能	
4. 3. 1. 3	設計する日程計画	
4. 3. 1. 4	日程計画のオフライン化	
4. 3. 1. 5	提案する方法の適用限界	
4. 3. 2	資源制約がある場合のディスパッチング	
4. 3. 2. 1	標準的な優先順位ルールとの比較	
4. 3. 2. 2	最適性に関するこれまでの研究	
4. 3. 2. 3	ディスパッチング法の限界	
4. 3. 2. 4	中間バッファ	
4. 3. 3	現場改善との関係	
4. 4	結論	61
第5章 結		
5. 1	本論の成果	63
5. 2	今後の展望	65
	謝 辞	67
	参考文献	68

第1章 序

1.1 本論の背景

我が国の社会経済の繁栄は、工業技術・科学技術の発展を基礎として成り立っていると言われている。その中でも、生産管理・品質管理の技術と実践には、きわめて優れた特色があり、それらが果たしてきた大きな役割は、誰もが認めるところである。生産管理分野においては、戦後日本で生まれた典型的な管理技術として、カンバン方式〔1〕が有名であるが、実際、それに代表される pull 型生産管理のアイデアと実践は、大変ユニークなものであった。

生産管理研究の中心を成すスケジューリングは、製造工場に適用対象を限るものではなく、運輸・流通・通信・サービス業など広範囲及ぶ基本的な技法であって、相当広い問題を含むものである。そのため、常に解決の要請があり、古くから研究〔2〕〔3〕が続けられ蓄積されてきた。スケジューリングの視点は、カンバン方式の本質が、徹底した平準化生産の上に成り立っているスケジューリングの方式でもあることが明らかになってゆくに連れ、従来の順序付け問題より大きなものとなり、生産管理の方法論として点検されることとなった。pull 型生産などを含むスリムな生産管理によって、強い工業競争力が達成されることが確信され、さまざまな観点から、新しい生産システムの姿〔4〕〔5〕として概念化されてきている。

近年では、コンピュータ利用の技術が飛躍的に進歩し、CIM 生産なども、かなり普及してきている。情報インフラストラクチャーが備われば、カンバンという手段に頼らなくとも、さまざまな、よりフレキシブルな生産管理を実現し、容易にコントロールすることができるようになりつつある。このような環境の下では、競争力維持のために、仕事全体の流れを見れるようにする〔6〕ことや、全体的最適化〔7〕が、きわめて重要であると指摘されている。しかしな

がら、それらを実行する手段は、必ずしも、明確になっているわけではない。具体化するためには、それぞれの生産システムにおいて、生産管理の方式としてふさわしいものがいかなるものであるのか、的確に探求できるための、一般的な方法論が必要となっている [8]。

これまで生産管理には、実証例だけでは、決して問題の解決にならない側面があると言われていた。なぜならば、生産管理研究を実証しようとしても、その事業・その工場に、その時だけ当てはまる特殊要因が、どうしても存在するため、断片的・一過的なケーススタディとなってしまうやすく、成功する生産管理方式として考察され、集成されることはほとんど考えられなかったからである。このため、生産管理の方式について、現実に即しつつ一般的な結果を与える研究が要請されているにもかかわらず、解決されてきていない。

このような背景の下で、本論は、生産システムのモデリングという手法によって、現実に起こる生産管理の方式とスケジューリングをシステムティックに分析し、そこから導かれる原理を考察することによって、生産管理とスケジューリングを、実証的側面から一般化する研究として位置づけることができる。

1.2 スケジューリング問題の研究課題

優れた生産管理やスケジューリングに対する研究が、ますます重要な技術であることが認識されてきている一方で、これまでの研究は、実証が軽視される傾向があった。

古くから、生産スケジューリング問題に潜む組み合わせ数理的な問題を取り出し、その解法を研究することは、大変盛んに行われている。しかし、理論が現実から分離してしまい、現実問題との乖離が大きくなって行くばかりであることも、頻繁に指摘されるようになってきている。もともと、スケジューリング問題とは、究極的には、何をいくつどういう順で作るのかを決定することである。しかし、実用としてのスケジューリングは難しいため、研究の方向は、たとえば、古典と言われる文献に、次のように明快に述べられている [9]。

“実際問題において、順序づけ問題の研究がむずかしいのは、順序づけ問題だけを、他の問題から切り離して純粋に取り出すことができない（他の決定問題との間に交互作用がある）ことが多いからである。・・・中略・・・そうなると、残念ながら、これらの問題はそれらの特定の条件に固有な問題となってしまう、それらの条件を離れて、一般的な興味を持って研究できるようなものは、何もなくなってしまう。この問題を解決するには、そのような変更が起こることを無視して、問題を順序づけだけに単純化してしまえばよい。”

“われわれは、何を、どうやって、作るかについては、完全に決定されてしまっているものとして、問題を考えることにする。”

すなわち、スケジューリング研究においては、対象となるジョブは、外的に与えられることを強く仮定していた。これは、“純粋な”順序づけ問題と呼ばれ、その後のスケジューリング研究の多くは、この立場から問題を構築している。

このように構築された問題に対し、主として、何らかのスケジュール評価基準を最適にするための、順序付け解法が研究されてきた。それらのアプローチは、大きく分類 [10] [11] して、OR・AI・マンマシンシステムとして発展している。

さらに、順序付け問題に限定しても、数理的にはまだ極めて難しいので、簡単にするため、今一つ大きな仮定が設けられてきた [12]。

“さらに、きわめて重要な制約条件を一つつけ加えなければならない。それは単純ジョブショップ過程においては、制約のある資源はただ1つだけであるということである。”

これによって、特定の機械、作業員、治工具を組み合わせるという、むしろ普通のジョブショップ作業は研究対象から除かれ、単純ジョブショップを当然視して研究されることが多かった。

コンピュータの発達した現在では、しかしながら、これら前提とされてきた仮定にとらわれる必要はなくなってきていると考えられる。少なくとも、それらは、もはや計算上の制約とはならないであろう。現実に応じた立場から、従

来複雑なため無視してきた問題に取り組む新たな研究が、まさに求められてきている。

1.3 本論の目的

本論では、1.1及び1.2に記した問題点を意識して、以下を解決することを目的とする。

まず、スケジューリングを、純粹な順序付け問題として扱うのではなく、何をいつ作るべきかという選択が、スケジューリング結果に与える影響を分析する。特に、反復受注生産において、生産計画期間の長さによって各期のスケジューリング対象集合が変化する影響を明らかにする。そこでは、実証的に考察しつつも、単なるケーススタディではない、一般的な結論を導くことを目的とする。このためには、現実の生産システムをモデリングし分析することが不可欠で、その手段により本質を考察し、結論を導くことができる。

次に、ユニークな生産管理方式である pull 型生産を、新しい視点から考察する。見込み生産で有効とされる pull 型生産の本質は、生産・出荷量に関する何らかの計画目算がはずれた時に、作り過ぎを防止することにあるから、基本的には、継続取引きを想定した大量生産品のためのものであると考えられている。ところが、受注型生産であっても、建築部品などのように工事進行に呼応した納品が求められる事業では、工事が遅れるために納期が延期されることがあるので、pull 型生産としても、適合できることを明らかにする。これは、受注生産型生産管理の特性として、これまで考えられてこなかった観点である。

さらに、単純ジョブショップ過程でない作業について、小日程計画を研究対象として扱うものとし、その方法とその効用について明らかにする。特に、作業や治工具を同時に組み合わせ必要とする工程を深く分析し、適するスケジューリング方法を、実践運用も含めた観点から考察する。

これらの解決すべき問題は、現実の複雑なシステムを基に考察するものとし、また、汎用的な結論を得るために生産システムをモデル化することの有効性を実証することを目的とする。

1.4 論文の構成

本論は、以下のように構成されている。

第1章では、これまでの生産管理研究の進展を概観した上で、研究の意義と必要性を論じ、研究目的を明らかにした。

第2章では、複雑な生産組み合わせのある多品種バッチ生産による、建築材料生産をモデリングし、主として、上述した要素のうち、何をいつ作るのかという部分を考察する。受注型生産であって、かつ、生産工数が小さい場合であっても、生産在庫量は生産計画対象によって大きく変化することを示し、とりわけ、ある状況下では、pull型生産方式によって、より少ない在庫運転を達成できることを解明する。

また、複雑な生産組み合わせが、シミュレーションによって動作解明できることも実証される。

第3章では、第2章の状況を生産管理の型として一般化する。すなわち、受注生産でありながら、発注納期は絶対のものではなく、延期されるかもしれないという構造を抽出して検討する。建築材料業などでは、工事の進行に伴って、予定施工日が遅れることは、日常的に見られることである。この構造で、生産管理方式として pull 型を選択する方が良いのかどうか一般的に検討するため、需要変動の大きさ、納期延期の程度、生産リードタイム、バッチ生産の影響などを考慮する。

結論として、push型またはpull型生産管理に適する性質は、納期延期の程度と生産リードタイムによって表されることを明らかにする。この際、pull型生産におけるサービス水準の意義について考察し、現実にかかる不良品再生産との関連を議論する。

第4章では、ジョブショップスケジューリングの現実的な側面に着目し、複数資源を同時に必要とする加工ガラス製造工程の順序付けを議論する。実作業においては、設備・治工具・作業員などのいわゆる生産資源は有限数であって、それを矛盾なく割り当てしなければならない。このため、順を決定する際には、細かな制約を周到に考慮しなければならないが、この制約が多くなるほど、ジ

ジョブの割付は困難になり、良い順の得られる可能性は小さくなる。

この問題に対して、通常、中日程計画で与えられる、割り付けるべきジョブの集合に基づく差し立て計画に代え、予め、制約にすべて合致する好ましい割付パターンを求める方法を提示する。従来常識にとらわれず、言わば、先に小日程計画を作り、それに合うよう中日程計画の方を調整する思想である。この方法では、小日程計画は何回でも再利用できる利点があり、作業習熟効果も期待できることも議論する。

第5章では、本論を通じて得た結論をまとめて述べ、さらに、研究の発展すべき方向を指摘して、論文を完結する。

第2章 生産組み合わせ制約のある

多品種変量受注生産方式の設計

2.1 はじめに

多品種変量継続受注生産において、生産上の組み合わせ制約を考慮し、製品在庫量を少なくさせる生産方式について考える。一般に、継続生産品の生産形態を受注生産とするのは、受注後の納期が生産所要期間に比べて充分長い場合や、受注量の極めて少ない品種があり、在庫を持ちにくい場合である。受注生産である限り、製品在庫量を少なくするには、当然のことであるが、納期(または出荷日)に注文量だけ生産完了させれば良い。

多くの工場では、実際には、生産システムにさまざまな制約があり、上記生産方式を実現することはできない。最も普通には、ある期間内の生産可能総量に上限があるため、納期が集中する場合には、やむを得ず前倒し生産することになり、在庫が発生する。また、多品種生産では、多品種が故に、生産品種の組み合わせによって生産効率が左右されてしまうことがある。そして、これを避けるために、後納期品を先に生産してしまい納期以前に生産完了してしまうことがある。さらに、少量生産を行なおうとしても、一回に生産できる最少数量が、たとえば、設備ハードウェアにより制限されてしまい、生産量が注文量を上回ってしまうこともある。この場合、受注生産であるにもかかわらず、未受注品を生産してしまうことになる(以下、この未受注品のことを副生品と呼ぶ。)。これらは、多品種変量生産でしばしば観察される制約であり、在庫量、納期余裕、品種組み合わせ効率、並びに副生品発生量などを総合的に考慮し、生産方式が決定される。

本章の内容の大部分は、文献 [13] に基づいている。

生産方式として、まず生産計画について考えると、各注文の生産完了を納期とできるだけ一致させることが基本であろうが、もし、それで不満足であれば、現実的には、生産計画期間を長くすることで対応することが多い。これによって、生産量を平準化したり、良い生産効率となる組み合わせを得やすくしたり、あるいは、合計注文量が多くなり副品を作らずに済むことが期待できる。しかし、この方法は、在庫量を多くすることに他ならないし、必ずしも納期切れ(納期までに生産完了しないこと)しにくくなるものでもない。生産計画期間の決定に際して、上記事項を同時に定量的に評価することが重要である。

ところが、この問題は、多目的評価が必要なことと、何らかの組み合わせ効率を扱うことになるため、解析的に最適化することは容易でない。そのため、生産現場では、単なる習慣か生産計画担当者の勘に頼って決定しているのが現状である。本章では、このような背景から、操業データを基に、シミュレーションにより合理的な生産計画期間を決定する方法を提示する。

次に、組み合わせ生産で、簡単に効率を高められる方法として、見込み生産について考える。見込み生産では、一般には、受注生産よりも生産タイミングに自由度が高くなるので、不利な組み合わせを避けやすくなるが、その反面、最低でも安全在庫分だけ在庫量が増えてしまうと考えられる。特に、多品種生産では、膨大な在庫量となりかねない。そのため、敢えて見込み生産しようとは考えられにくい。

しかしながら、受注生産についてもその実態を調べると、しばしば顧客の都合により、出荷日が契約上の納期よりも遅くされ、納期以降も在庫されてしまうことがある。たとえば、建築業・建築材料業においては、物件ごとの構成部材や工事計画は、施工予定日よりはるか前に決定されるので、材料生産や施工手配は受注生産されることが多い。しかし、この業種では、往々にして、悪天候や職人不足のため、客先施工日が施工予定日より遅れがちであり、そのため生産側以外の理由によって契約納期が延期される。出荷日は生産完了後まで確定できないことも多いが、それにもかかわらず、契約納期と出荷日の差異のため発生する保管費の負担について、はっきりした商習慣は、必ずしもできて

いない。この場合には、もし、別注文(別物件)に転用することができる部材があるのであれば、部材の生産計画時点で客先を決定する受注生産よりも、むしろ、見込み生産を行う方が、在庫量を減少させることができる可能性がある。本章では、この着眼から、生産方式として、多品種の継続生産品のうち一部を見込み生産とすることを検討し、見込み生産品種の決定法を提案する。

2. 2では、本章で対象とするモデルを定義する。それを基に2. 3で、実例によって生産システムを評価し、生産方式設計に関する知見を得る。2. 4で、この方法論について考察する。

2. 2 想定する生産システムのモデル化

2. 1で述べた特徴をもつ生産システムの例として、バンク・モールド生産による多品種生産を考える。たとえば、セメント系建築材料パネル生産などがこれに相当する。この方式は、図 2-1 に示すようなバンクを最少生産単位とするバッチ生産であり、各バンクを組み合わせ一定長さのモールドによって生産する。

寸法品種ごとに定められたバンクバッチサイズを生産単位とするため、第1段の組み合わせとして、各品種の生産量は、それぞれその整数倍になるという

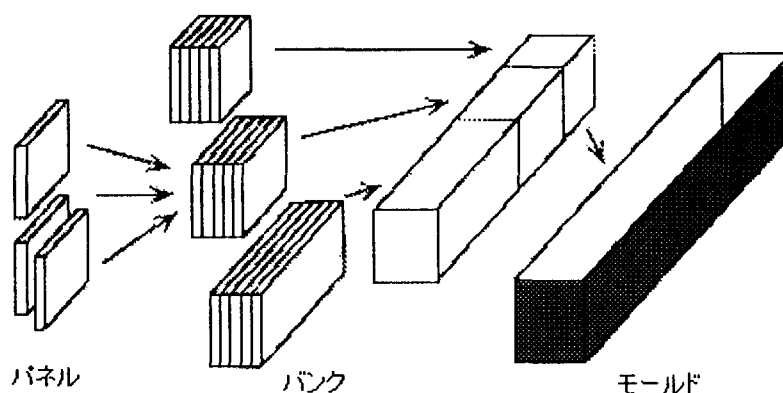


図 2-1 バンクモールド生産

パネルの生産数はバンクバッチサイズで決定され、さらに組み合わせ方により生産効率が増減する。

制約を持つ。すなわち、生産単位は注文単位と一致しなくなり、1バンクが複数の注文から構成されることにもなる。さらに、より一般性を考慮し、同一寸法の品種に、個別品と継続生産品である標準品を考えることにする。個別品とは、寸法が同一の標準品と同一バンクバッチで生産することはできるが、必ず固有の物件への個別生産品となる部材のこととする。

多品種バンク編成後、数バンクの長さを組み合わせ、一定長モールドに組み込む。この際できるだけコンパクトに詰め込み、使用するモールド数が少なくなるよう第2段の組み合わせを考える。

これら組み合わせが定められたならば、想定する生産システムは、モールドによる単工程生産である。以下の議論は、この構造を前提とする。

2.2.1 生産量の決定

この生産を受注生産するならば、各品種の生産計画期ごとの生産量は以下のように決定される。ただし、注文量は全て生産しなければならず、また、各注文の契約納期と対応する生産計画期は既知とする。契約期間と生産計画期の対応については、2.2.3に記す。

寸法品種 i の第1期生産量 $X_{i,1}$ は、生産計画期が第1期となる受注量の合計を $Y_{i,1}$ 、バンクバッチサイズを b_i として、

$$X_{i,1} = Y_{i,1} \quad \text{if } \text{mod}(Y_{i,1}, b_i) = 0 \quad (2-1A)$$

$$X_{i,1} = ([Y_{i,1}/b_i] + 1) \times b_i \quad \text{if } \text{mod}(Y_{i,1}, b_i) \neq 0 \quad (2-1B)$$

である。ここで、 $[Y_{i,1}/b_i]$ は $Y_{i,1}/b_i$ を越えない最大の整数を表し、 $\text{mod}(Y_{i,1}, b_i)$ は $Y_{i,1}$ を b_i で割った時の整数余りを表す。バッチサイズが b_i であるため、(2-1B) のケースでは、 $b_i - \text{mod}(Y_{i,1}, b_i)$ だけ副生産品が発生することになる。なお、副生産品は、第2期以降の受注に対し引当て使用したいので、標準品として生産し在庫しておく。

第2期以降は、まず前期末までの副生産品による引当てを行い、その残りと個別品を生産すればよい。したがって、第 n 期生産量は、標準品量を $D_{i,n}$ 、個別品量を $C_{i,n}$ 、副生産品量を $F_{i,n}$ とすれば、

$$X_{i,n} = Y_{i,n} - F_{i,n-1} \quad \text{if } \text{mod}\{(Y_{i,n} - F_{i,n-1}), b_i\} = 0 \text{ and } D_{i,n} \geq F_{i,n-1} \quad (2-2A)$$

$$X_{i,n} = \{(Y_{i,n} - F_{i,n-1}) / b_i + 1\} \times b_i \\ \text{if } \text{mod}\{(Y_{i,n} - F_{i,n-1}), b_i\} \neq 0 \text{ and } D_{i,n} \geq F_{i,n-1} \quad (2-2B)$$

$$X_{i,n} = C_{i,n} \quad \text{if } \text{mod}(C_{i,n}, b_i) = 0 \text{ and } D_{i,n} < F_{i,n-1} \quad (2-2C)$$

$$X_{i,n} = \{(C_{i,n} / b_i) + 1\} \times b_i \quad \text{if } \text{mod}(C_{i,n}, b_i) \neq 0 \text{ and } D_{i,n} < F_{i,n-1} \quad (2-2D)$$

である。ここで、

$X_{i,n}$: 第 n 期生産量(標準品と個別品の合計)

$Y_{i,n}$: 生産計画期が第 n 期となる受注量

$D_{i,n}$: 生産計画期が第 n 期となる標準品受注量

$C_{i,n}$: 生産計画期が第 n 期となる個別品受注量

$F_{i,n}$: 第 n 期末副生品量(すべて標準品)

とし、

$$Y_{i,n} = D_{i,n} + C_{i,n}$$

である。また、 $X_{i,n}$ の生産が完了した時点での副生品量は、

$$(2-2A) \text{ の場合 } F_{i,n} = 0$$

$$(2-2B) \text{ の場合 } F_{i,n} = b_i - \text{mod}\{(Y_{i,n} - F_{i,n-1}), b_i\}$$

$$(2-2C) \text{ の場合 } F_{i,n} = F_{i,n-1} - D_{i,n}$$

$$(2-2D) \text{ の場合 } F_{i,n} = F_{i,n-1} - D_{i,n} + b_i - \text{mod}(C_{i,n}, b_i)$$

となる。ただし、初期副生品量は 0 とする。

(2-2A)、(2-2B)では、第 $n-1$ 期副生品は一旦すべて引当て消化されるが、(2-2C)、(2-2D)のケースでは、第 $n-1$ 期副生品が第 $n+1$ 期に持ち越され、さらに第 n 期副生品が加わることにもなる。なお、任意時点での副生品量は、期内の生産順序計画を考えなければ求めることはできない。

2. 2. 2 見込み生産の場合の生産量

見込み生産を導入する狙いは、2. 1で着眼を述べたように、組み合わせを容易にすることと、顧客による契約納期の延期に伴う在庫増を回避することである。したがって、生産計画時点で、その期に出荷される量を注文ごとに予想す

ることはナンセンスである。なぜなら、それは、個々の注文を、延期を見越して契約納期以後に生産完了させることと等価だからである。このような観点から、ここでは、契約納期にとらわれず、品種ごとの在庫水準を一定とする常備品管理方式を考えることにする。また、見込み生産方式の生産計画法は、定期計画法と発注点法に大別されようが、多品種組み合わせ生産について考えている訳なので、計画サイクルが一定となる定期補充点方式 [1 4] を採用することにする。

品種 i の補充点を Z_{0i} に設定し、第 $n-1$ 期末の在庫量を $Z_{i, n-1}$ とすれば、受注生産する個別品量 $C_{i,n}$ も考えて、第 n 期生産量 $X_{i,n}$ は、

$$X_{i,n} = Z_{0i} - Z_{i, n-1} + C_{i,n} \\ \text{if mod}(Z_{0i} - Z_{i, n-1} + C_{i,n}, b_i) = 0 \text{ and } Z_{i, n-1} \leq Z_{0i} \quad (2-3A)$$

$$X_{i,n} = \{(Z_{0i} - Z_{i, n-1} + C_{i,n})/b_i + 1\} \times b_i \\ \text{if mod}(Z_{0i} - Z_{i, n-1} + C_{i,n}, b_i) \neq 0 \text{ and } Z_{i, n-1} \leq Z_{0i} \quad (2-3B)$$

$$X_{i,n} = C_{i,n} \quad \text{if mod}(C_{i,n}, b_i) = 0 \text{ and } Z_{i, n-1} > Z_{0i} \quad (2-3C)$$

$$X_{i,n} = \{(C_{i,n}/b_i) + 1\} \times b_i \quad \text{if mod}(C_{i,n}, b_i) \neq 0 \text{ and } Z_{i, n-1} > Z_{0i} \quad (2-3D)$$

である。ここで、(2-3C)、(2-3D)において、

$$Z_{i, n-1} > Z_{0i}$$

となり得るのは、バッチサイズ以内の端数のためと、個別品生産に伴う副品のためである。

常備品見込み生産を導入する妥当性について考えてみよう。顧客により契約納期が延期された結果として、出荷日が k となる品種 i の個々の注文量を $y_{i,k}$ とし、生産量 $X_{i,n}$ の内 k に生産される量を $x_{i,k}$ とすれば、 k における見込み在庫量は、

$$Z_{i, n-1} + \sum_{j=\text{期初}}^k (x_{i,j} - y_{i,j})$$

であるから、期平均在庫量は、

$$\left\{ Z_{i, n-1} + \sum_{k=\text{期初}}^{\text{期末}} \sum_{j=\text{期初}}^k (x_{i,j} - y_{i,j}) \times \Delta k \right\} / \text{期の長さ} \quad (2-4A)$$

となる。ここで、 Δk は在庫量計算間隔である。

(2-4A)を小さくするためには、 $y_{i,k}$ の契約納期に関係なく、 $x_{i,k}$ と $y_{i,k}$ が全てのに k ついて等しいことが好ましい。ここで、 $y_{i,k}$ は注文であるから、操作できる量ではなく、本質的な問題は、生産計画により $x_{i,k}$ の生産速度を定める時に、が未知なことである。したがって、もし $\sum y_{i,j}$ が時間区間ごとに大きく変動するならば $x_{i,k}$ を追随させるのが難しくなり、出荷量が一定でない品種は、たとえ納期延期が大きくても、見込み生産には向かないことになる。

一方、受注生産在庫量は、 $y_{i,k}$ の生産完了日を $l_{i,k}$ とすれば、

$$\sum_{i \in X} y_{i,k} \times (k - l_{i,k}) / \text{期の長さ} \quad (2-4B)$$

である。ただし、品種 i の総在庫には、さらに副生品が加わる。(2-4B)において、 $l_{i,k}$ は、契約納期と一致させることが一般的には最良な生産計画となることは言うまでもなく、(2-4B)の値をそれ以下にすることはできない。

(2-4A)、(2-4B)の二量を比較して、もし(2-4A)の方が少なくなるのであれば、その品種については、常備品見込み生産とすべきであり、その方が在庫量を低減させることがわかる。

(2-4A)、(2-4B)において、 $x_{i,k}$ 、 $l_{i,k}$ を求めるには、多品種生産計画を定めなければならないが、ここで問題は、逆に常備品品種を定めなければ、生産計画を定められないことである。本章では、見込み生産比率をパラメータとし、総在庫量をシミュレートする。

2. 2. 3 生産計画期間

前節までの定式化において、生産量 $X_{i,n}$ は、もちろん、生産計画期間の関数となる。定期的に生産計画を行う受注生産では、標準的な計画方式とは、図2-2に示す計画リードタイム A 、計画サイクル B の二つのパラメータで表すことができよう。図2-2において第 n 期生産計画とは、生産計画日 T_n に契約納期が $T_n + A$ 以上 $T_n + A + B$ 未満となる受注量 $Y_{i,n}$ を対象とする。ただし、 A 、 B はともに正数とし、 $T_{n+1} = T_n + B$ である。また、納期単位を基準化して考えて

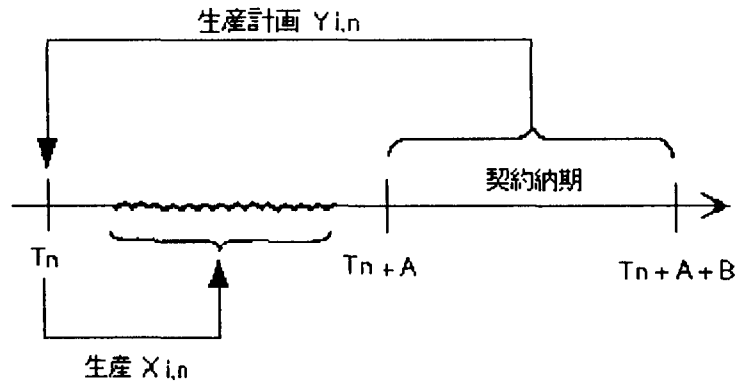


図 2-2 受注生産における生産計画方式

生産計画日 T_n では、納期が T_n+A 以上 T_n+A+B 未満の受注を対象とする。

も一般性を失わないので、最少出荷単位は 1 とする。この二つのパラメータによって、生産計画期間が決定され、 $X_{i,n}$ が決定されることになる。

2. 2. 4 生産システムの評価尺度

想定する生産システムは、注文量を与えれば生産量が必然的に決定される。しかし、2. 2. 2、2. 2. 3で提起した生産方式パラメータ（見込み生産比率、計画リードタイムA、計画サイクルB）によって、生産システムの効率に優劣ができる。これを次の量で評価する。

(1) 在庫品回転率

在庫品回転率は、総出荷数/平均在庫量で定義される。(2-4A)、(2-4B)より第 n 期平均在庫量は、

$$\sum_i \{ Z_{i,n-1} + \sum_{k=期初}^{期末} \sum_{j=期初}^k (X_{i,j} - y_{i,j}) \times \Delta k + \sum_{k=期初}^{期末} y_{i,k} \times (k - l_{i,k}) + \sum_{k=期初}^{期末} F_{i,k} \} / B \quad (2-5)$$

であり、平均在庫量は、充分多くの生産計画期の平均値とする。ここで、 $F_{i,k}$ は、時刻 k における品種 i の副生品量である。

素材生産の場合、製品在庫量は、原料や仕掛かり品在庫量よりも、はるかに高コストであることが多いので、ここでは製品在庫量だけを考慮する。

(2) 納期余裕

受注生産品は、万一不良が発生した場合、再生産する必要がある。そのため、生産完了日と納期の間には、生産工数以上の余裕が必要である。しかし、実際には、不良率と納期切れ頻度の問題となることが多く、もし、極めて小数ならば、ほとんどの場合、特急品生産やコストを度外視した対応(この例では大板から切り出す)を考えることもできる。したがって、納期余裕は、一律的尺度の制約条件として与えるよりも、次のように、納期切れ確率として評価する方が現実的である。

生産完了が、延期を含めた納期よりもさらに遅れる量 $\sum_{k-l_{i,k}<0} y_{i,k}$ 及び、再生産不能量 $\sum_{k-l_{i,k}<0} y_{i,k}$ を求めることによって、納期切れ確率は、
 $0 \leq k - l_{i,k} < \text{生産工数}$

$$\frac{(\sum_{k-l_{i,k}<0} y_{i,k} + \sum_{0 \leq k-l_{i,k} < \text{生産工数}} y_{i,k} \times \text{不良率})}{\text{総出荷数}} \quad (2-6)$$

で算出できる。

一方、見込み生産品の納期余裕は、安全率として考慮すべきものである。具体的には、式(2-5)第一項中の系列 $Z_{i,n-1} + \sum \sum (x_{i,j} - y_{i,j})$ が 0 となる確率から、 Z_{0i} の値を決定する。

(3) 副生品量

第1段組み合わせ効率、バンク編成で生じる副生品量の割合

$$\sum_i F_{i,n} / \text{総出荷数} \quad (2-7)$$

で評価できる。小さいほど好ましい。これは、在庫量の一部であるが、死蔵品として廃棄しなければならなくなる可能性があり、コスト負担が他の在庫とは異なるため、別途考慮する。もし、個別品ばかり受注され、(2-2C)、(2-2D)のケースが起り続けるなら、理論的には、 $F_{i,n}$ は増加し続けるので、 $\sum F_{i,n}$ が一定値に収束しない場合は、適当な時刻における値で評価する。

また、常備品の中にも、実質的に回転しない在庫が含まれるかもしれないが、

それを一義的に区別するのは一般に困難である。

(4) 品種組み合わせ効率

第2段組み合わせとしてバンクをモールドに組み合わせる時、高効率で組み合わせることのできるバンク数の全バンク数に対する比率で評価する。高効率とは、モールド長に対する合計バンク長の比率が一定値以上となることとし、組み合わせ方法は BFD ルール [15] とする。この組み合わせ問題の高速な厳密最適化法は、まだ知られていない。

さて、これら評価尺度をコストに換算すれば、提起するパラメータ値ケースごとのコスト差を求めることができ、最適な生産方式を選択することができる。たとえば、建築材料のように体積の大きい物では、在庫量は倉庫面積に直結し、総コストに占める地価の要素が大きくなるので、それぞれの工場立地事情にふさわしい生産方式とは何であるのか判明させることができる。

2.3 実受注データによるシミュレーション

本章では、前章に記した方法によって各品種の生産量を定め、生産方式パラメータを用いシミュレーションを行う。

2.3.1 解析データの背景

実例として、某建築材料工場の出荷実績記録データを解析する。

寸法品種数は 650 であるが、その内訳は図 2-3 に示すとおり少種に集中し、典型的多品種変量生産の特徴を持っている。本例の場合は、大面積部に一定寸法パネルが多用され、コーナー部や装飾部で物件ごとの特異形状が使用されるからと考えられている。少種の大量受注品種は、常時ほぼ一定量の出荷があり、見込み生産適性品種と考えられる。また、図 2-3 からわかるよう個別品は全体の約 4% である。参考のため、他地域工場データも調べてみたが、ほぼ同傾向であった。

出荷に関しては、一日ごとを通常とするが、祝休日には出荷がない。受注は、生産能力ほぼ一杯となる量であり、操業可能な程度に契約納期が平準化されて

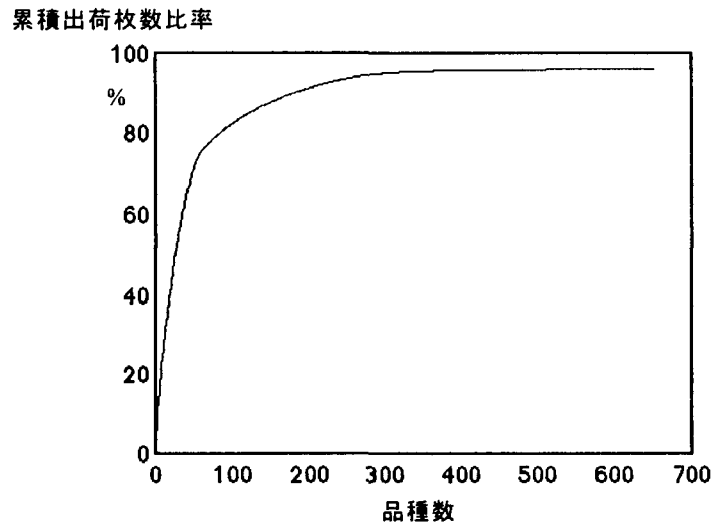


図 2-3 品種集中度
多品種変量生産の特徴

受注されている。

生産工程は、ボトルネックとなる鋳込み工程と能力無限と考えるよい固化工程から成っていて、實際上、単工程とみなせる。前者の生産工数は品種により 0.002 から 0.009 であり、後者は全品種とも 2 である。さらに、生産計画自体に工数 1 を必要とする。すなわち、時刻 T_n で生産計画されると、最早 T_n+1 で生産開始され、 $T_n+3.002$ で生産完了される。

顧客による契約納期の延期は、延期なしが 30% 占めるが、平均値は 6 であり、生産工数よりも長いことになる。

2.3.2 生産計画

一期ごとの生産量を既に決定できたので、工程への投入タイミングを決定すれば生産計画が作成できる。前節に記したように、受注量が生産能力に匹敵しているので、第 n 期生産計画では、順序付けした上で T_n+1 から連続投入することにする。ただし、受注量の平準化が充分でない場合には、時刻 T_n+1 において、第 $n-1$ 期品の生産が終了していないこともある。その時は、第 $n-1$ 期品終了後直ちに続けて投入するものとする。

同一期内の順序付けは、まず、受注生産品に不良品再生産のための納期余裕が必要なので、これを見込み生産品よりも先に投入することにする。

受注生産品の生産順序は、製品在庫量を少なくする観点から、EDD ルール(納期順)や LPT ルール(最大作業時間順)が知られている。本例では、固化時間を含む生産工数の品種による相違が、出荷間隔よりもはるかに小さいので、EDD ルールとするのが適当であろう。ここで、2. 2. 1のようにして編成されるバンクには、複数の受注が含まれていることがあり、それらの契約納期が異なることがある。その場合には、同一バンクの中で最も早い契約納期を基準とする。また、同一寸法品種を 2 バンク以上作ることになる場合や副生品による引当ても、当然、契約納期の早い順に行うこととする。

見込み生産品と同一納期受注生産品の生産順序は、特定の品種に偏らせないよう配慮するが、特に積極的なルールは与えない。

一般に、生産方式を仮定した場合の生産計画最適化については、極めて多くの研究が報告されている。しかしながら、生産方式の解析法にとって、想定する生産システムに最適な生産計画ルールを捜し出すよりも、簡単な生産計画ルールによってでも、まず最適な生産方式を決定する方がよほど本質的であり重要である。もし、事例ごとに、より適する生産計画ルールがあるのならば、それを用いても全く問題はない。

2. 3. 3 実験

同一の受注について、各パラメータの値を表 2-1 に示すよう設定し、前節の方法でそれぞれ生産計画を作成して生産と出荷の受払いをシミュレートする。半年間の操業を対象とするが、未出荷品が含まれる末期を結果処理から除外し、有効なシミュレーション期間は 135 日 36 万枚分とする。

見込み生産の安全率は、この期間中どの品種も一回だけ在庫 0 となるよう設定する。また、予め在庫品回転率が高くなる順を調べ、表 2-1 に示す値になるまで、その順に見込み生産品種を選定する。

なお、バンク組み合わせと生産速度の計算には、事象駆動型シミュレータ

Witness(AT&T ISTEEL 社製)を用いモデル作成した。

表 2-1 実験パラメータと結果

ケース	計画		見込み生産		在庫品回転率			納期切れ確率	
	リード タイム A	リード タイム B	品種数	比率 %	見込み 生産分	受注 生産分	合計	受注生 産分%	合計%
#1	8	2	0	0	-	10.7	10.7	0.00	0.00
#2	8	5	0	0	-	10.8	10.8	0.00	0.00
#3	8	10	0	0	-	10.4	10.4	0.00	0.00
#4	8	15	0	0	-	10.0	10.0	0.00	0.00
#5	8	30	0	0	-	9.0	9.0	0.00	0.00
#6	8	2	99	79	16.0	8.1	13.3	0.00	0.00
#7	8	5	99	79	13.3	8.0	11.6	0.00	0.00
#8	8	10	99	79	11.0	7.2	9.9	0.00	0.00
#9	8	15	99	79	9.7	6.6	8.8	0.00	0.00
#10	6	2	0	0	-	12.8	12.8	1.57	1.57
#11	6	5	0	0	-	12.8	12.8	0.84	0.84
#12	6	10	0	0	-	12.4	12.4	0.47	0.47
#13	6	2	99	79	16.1	9.2	13.9	1.18	0.25
#14	6	5	99	79	13.1	9.0	12.0	0.42	0.09
#15	6	10	99	79	10.9	8.2	10.2	0.24	0.05
#16	6	5	14	26	15.6	11.9	12.7	0.48	0.36
#17	6	5	25	47	15.0	11.2	12.7	0.39	0.21
#18	6	5	50	71	13.7	9.8	12.3	0.43	0.12
#19	6	5	650	96	8.3	10.7	8.3	0.58	0.02
#20	6	2	14	26	19.6	12.2	13.5	1.28	0.95
#21	6	2	25	47	18.8	11.5	14.1	1.10	0.58
#22	6	2	650	96	9.5	12.1	9.5	1.60	0.06

結果を表 2-1 及び図 2-4 から図 2-7 に示す。

計画サイクル B を長くすると、個別品単独の組み合わせを回避しやすくなるので、副生品量は減少する。図 2-4 によると、計画サイクル B を 2 とするならば、0.9%の副生品が生じてしまい、B を 30 まで長くすれば 0.3%に低減できることがわかる。副生品は、死蔵として処分されるのならば不良品と同一視できて、すなわち B の与え方によって、不良率に 0.6%の差ができると考えられよう。

また、副生品量は、見込み生産するかしないかにほとんど影響されていない。

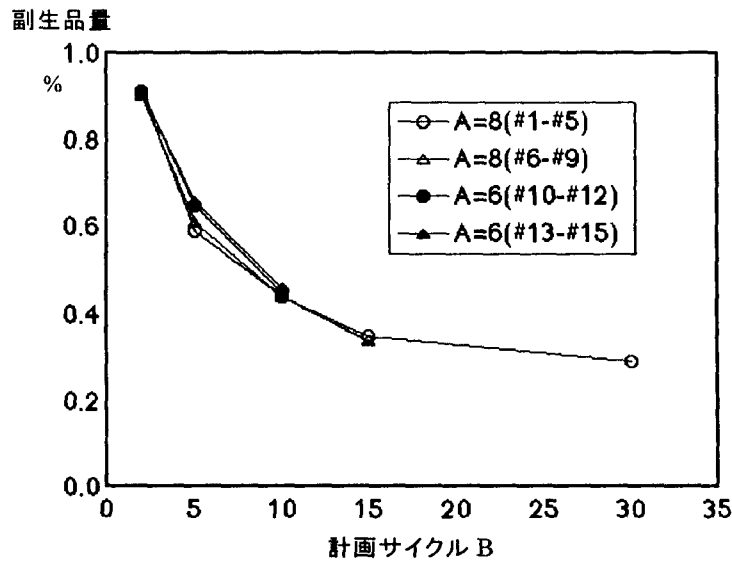


図 2-4 副生品量

このことから、見込み生産品には実質的な死蔵部分のないことがわかり、適切に常備品品種を選定できていることが考察される。

納期切れ確率を低くするには、計画リードタイム A を長くし、あるいは見込み生産比率を高くすればよいことは明らかである。表 2-1 では、実用上問題にならない低い値となるようパラメータを選んであり、ケース#10 を除き 1%未満である。計画サイクル B が 2 であるケースで、受注生産分の納期切れ確率が、しばしば 1%を越えてしまうのは、B が短かすぎるために生産量が平準化されず、生産量の多い期があると、次の期の生産開始が遅れてしまうからであると考察される。したがって、納期切れ確率は、受注生産比率が高くなるほど、計画リードタイム A の変化に敏感になっている。そのため、全受注生産する場合、B を 2 とするならば、A を 8 よりも短くしにくい、B を 5 以上とするならば、納期切れ確率を 1%未満に抑えたまま、A を短くできることがわかる。

次に、品種組み合わせ効率は、計画サイクル B を長くすることによって向上させられるという事前期待を抱いていたが、組み合わせ母数を大きくしても、このケースでは、図 2-5 に示すようわずかな平均値増加しか見込めない。それに比べ、生産計画期ごとのばらつきが大きく、実験範囲の中で、B は品種組み

品種組み合わせ効率(#6-#9)

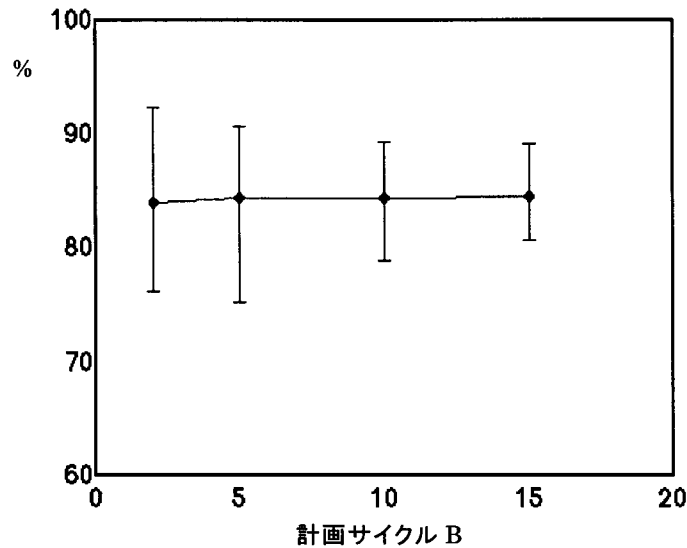


図 2-5 品種組み合わせ効率

合わせ効率に、ほとんど寄与しないと考えるべきであることがわかる。図 2-5 に示す以外のケースについても、結果は同様であった。図 2-5 において、B を長くするにつれて期ごとのばらつきが小さくなっているが、これは、母数が大きくなることによる当然な統計的挙動と考えられる。

最後に、在庫品回転率について考察する、全受注生産の場合、在庫日数は、組み合わせ制約を一切無視し、受注量も完全に平準化されているものと仮定すると、

$$\text{在庫日数} = A + \text{納期延期} - \text{生産工数} \quad (2-8A)$$

となり、計画サイクル B に無関係である。現実はこの仮定から多少はずれているが、B の影響はそう大きくないと予想できる。(2-8A)に副産品を加え、在庫品回転率に換算すると、B が短い場合に、図 2-6 に示すシミュレーション結果にほぼ一致することがわかる。したがって、B が長くなるにつれ在庫品回転率が低下してしまうのは、それだけ、副産品や組み合わせ効率を向上させたことが、在庫にしわ寄せとなってしまふからであると考察され、図 2-6 において、たとえば、ケース#5 は#1 より在庫品回転率が 1.7 減少してしまうなど、その程

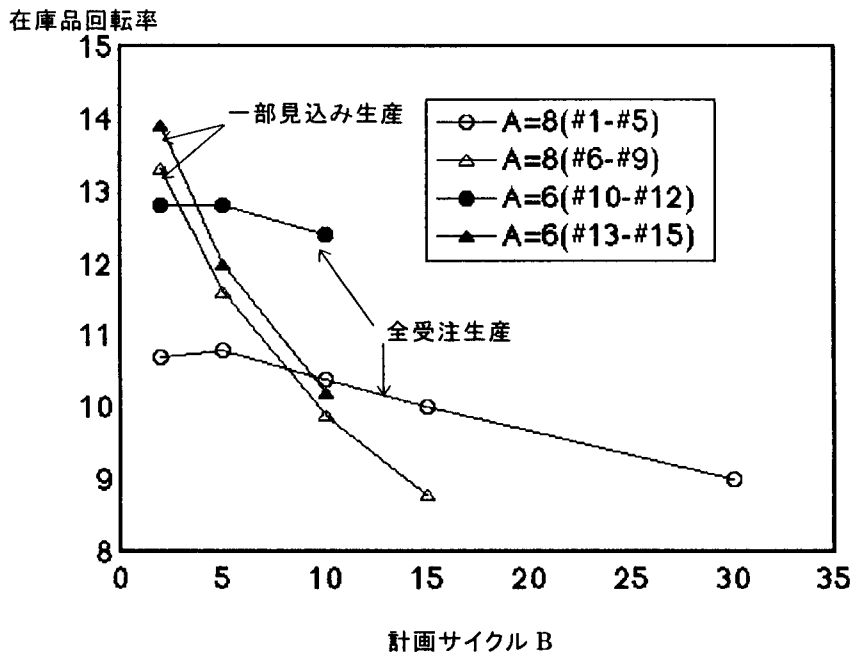


図 2-6 計画サイクルと在庫品回転率の関係

度が定量できる、ただし、B が 2 であるケース#1 や#10 で、B が 5 である#2 や#11 とほとんど同じ値となってしまうのは、副生品を多く生産するからである。このことから、全受注生産するならば、計画サイクル B を短くしても、もはや、在庫量が減少しなくなる領域のあることがわかる。

一方、一部見込み生産の場合、たとえば、計画リードタイム A だけが異なるケース#6 と#13 を比較すると、大勢を占める見込み生産分の在庫品回転率はほとんど変化せず、受注生産分の変化があるだけである。このことから、見込み生産品では、2.2.2 に述べたように、品種ごとの受注量の安定性が問題なのであって、A には影響されにくいと考えられる。受注生産分の在庫日数は、再び組み合わせ制約を無視すると、

$$\text{在庫日数} = A + B/2 + \text{納期延期} - \text{生産工数} \quad (2-8B)$$

となろう。受注生産品は、見込み生産品に優先して生産していることと、標準品の一部に副生品による引当てがあることを考慮し、生産完了時刻を T_n+2 と近似すると、たとえばケース#8 の場合、(2-8B) に基づく在庫品回転率は 7.9 と

なる。したがって、シミュレーション結果 7.2 との差が副生品と組み合わせによる在庫増相当分であると考えられる。

このように、常備品見込み生産と受注生産では、その在庫量決定メカニズムが異なるため、生産計画期間パラメータを操作すると、見込み生産の導入が、有利になったり不利になったりすることがわかる。図 2-6 では、一部見込み生産ケース#6、#7、#13 で、計画リードタイム A に影響されないことが有利にはたらし、全受注生産ケース#1、#2、#10 よりも在庫品回転率を高める効果が得られている。しかし、計画サイクル B が長い場合には逆効果になっている。

図 2-7 では、計画サイクル B が短い場合に、見込み生産比率を変化させ、最大在庫品回転率を求める。B を 5 とする時には、見込み生産比率を 50%以下とするのがよく、B を 2 とするならば、50-80%にするのが好ましいことがわかる。しかし、いずれの場合も、見込み生産比率の変化に対して鈍感である。図 2-7 には、全品種を見込み生産とする極端な場合をも示すが、その場合には、非回転在庫が多発し、在庫品回転率が低下していることがわかる。すなわち、品種数では多数である回転の悪い品種を見込み生産すると、一気に在庫量が増加し

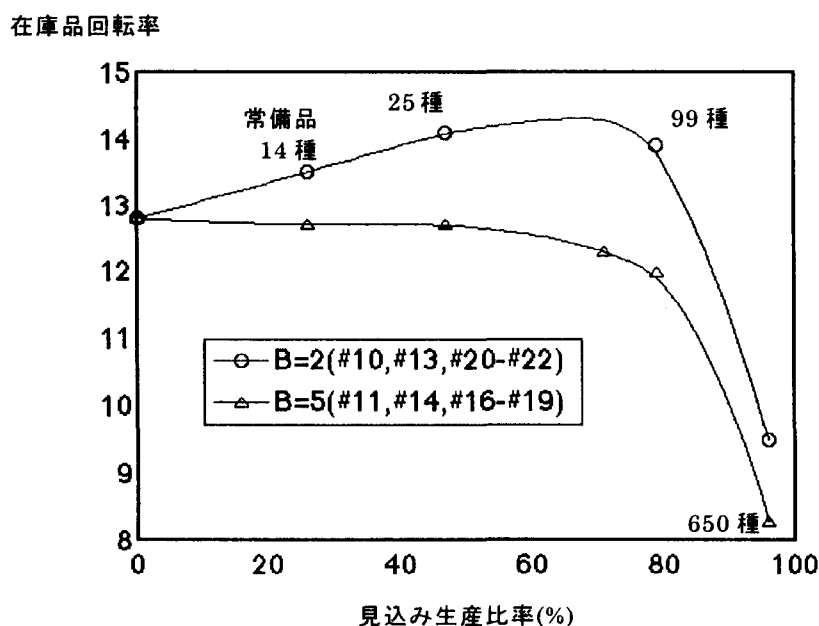


図 2-7 見込み生産比率と在庫品回転率の関係

てしまうことになる。これは、多品種変量生産の特徴であって、在庫品回転率を高水準に維持するためには、品種別販売情報を定期的に分析し、それにしたがって常備品品種を選定することが求められる。

2.4 考察

多品種生産問題は、組み合わせ制約を含む場合には解析的に最適化できないことが多く、生産方式設計に関する指針がほとんど知られていない。そのため、本章では、パラメータ化シミュレーションを提案し、実データを用い解析すれば、容易には知り得ない優れた生産方式に到達できることを実証した。取り上げた計画リードタイム A、計画サイクル B、見込み生産比率は、典型的多品種受注生産に必ず現れるパラメータであるので、生産方式の設計解析法として汎用展開性が高い。組み合わせに係る評価尺度は、事例により適宜増減させることが必要となるが、本章で提示する方法論は、ソフトウェアを含め変形が容易であり、多くの事例で踏襲できると考えている。

多品種生産方式として、常備品方式は知られているが、多品種生産計画が複雑なため、その品種選択方法と総在庫量への影響評価の方法は、必ずしも確立していない。一般に常備品は、「需要変動や供給変動の吸収、生産期間の短縮、原価の引き下げ、工程管理の容易化」がその効果とされている一方で、見込み在庫が増えると考えられており、そのため、「生産期間が長く、必要のつど手配したのでは受注納期に間に合わないものに限定すること」〔14〕とされている。本報では、契約納期が延期される場合には、これら効果を維持しつつ、さらに在庫量も減らせることを発見した。そのうえで、パラメータの操作によって在庫品回転率を最大化できることを示した。この方法は、顧客による契約納期延期への対策として一つの有力な方法論になると考えている。

2.3で展開したシミュレーションにおいて、見込み生産を定期補充点方式としたが、これを改良すれば、特に計画サイクルBの長いケースでは、さらに好ましい結果を得られると考えられる。また、実際には、納期延長が生産途中でわかることなどの例外的事項も発生しよう。需要変動の激しい場合には、長期

間の平均的挙動に固執せず、工場運転上可能であるならば、受注パターンに応じて、パラメータの値を途中で変えてみてもよい。本章で提示する方法は、このようなバリエーションを取り込む余地が残されている。しかしながら、生産方式の設計段階で適用する方法として、実用的価値が高いと考えている。

2.5 結論

多品種変量継続受注生産において、特徴的な生産システムの制約を与えた上で、合理的な生産方式を決定する方法論を提案した。

バンクモールド生産型の組み合わせ制約を持つ事例に適用し、生産形態と生産計画期間を定量的に設計評価することができた。

また、常備品見込み生産の導入によって、生産側以外の理由による納期延期に効果的に対処できる方策を実証した。

第3章 発注納期より確定納期が遅れる

取引の push/pull 型生産在庫

3.1 はじめに

建築部品・建築材料メーカーが自社製品を販売する場合、売買契約が成立し、ある物件に使ってもらうことが決まったとしても、いつ納品するのか正確なことがわかりにくい問題がある。

その理由の一つは、わが国の建築工事には数多くの工事業者・資材業者が関与するため、資材搬入計画・各種作業などの把握と進行を一元管理することが容易でないからである。工事計画の進捗管理に十分な費用をかけられるような高級物件以外では、デリバリ上のすべての問題を予期できるはずもなく、現実には、経験と阿吽の呼吸で部品納品が実行されているといっても言い過ぎではない。一般的な傾向を言えば、売買契約時点で予定されている工事計画は遅れやすく、そのため、発注時点で定められた納期は、後になって、顧客使用者側から延期されることがある。

また別の理由として、窓・ガラス・床壁材などのように、比較的容易にサイズ調整できる製品については、建物の基本設計段階では、その品の採用とおおまかなサイズだけを決定して、詳細設計段階になってから具体的に決定する習慣があるようである。特に、サイズの最終確定となると、建物の施工が始まってから微調整されることも少なくない。このため、詳細設計に手間取ると、当初の発注納期は延期され、実際の納期は、サイズ確定後に与えられる納品指示の直後となることが多い。その結果、売買契約時点から起算すると充分長い納期であったとしても、実務上は、納期の直前に確定注文が得られるという構造になってしまう

本章の内容の大部分は、文献 [16] に基づいている。

う。

建物の基本設計で採用されることになってから納品されるまでの期間は、小規模の建築であっても数ヶ月ある。その一方、建築部品の製造には、仮に素材調達から始めても 1 ヶ月も必要としないものも多い。そうすると、その場合の生産管理は、発注を受けてから受注生産すれば、生産能力に余裕のある限り、理論的には全て納期通りに生産完了できるはずである。したがって、発注納期に基づいて push 型生産するのが最も一般的である。ところが上記に述べた事由のために、確定納期は当初発注の納期よりも遅れることがきわめて多いため、発注納期通りの生産完了であったとしても、それなりの生産在庫が発生してしまう性質がある。

この問題について第 2 章では、発注納期を目標として生産しようとする push 型生産管理に代え、発注納期に基づかず実際に出荷された時をトリガとして生産する pull 型生産管理の方が、生産在庫が少なくなるケースのあることを示した。これは、このような納期延長のあるケースで、生産在庫がより少なくなる生産管理方式として、push 型と pull 型が拮抗する可能性を示すものである。しかし、第 2 章は、一つの具体的受注データに基づいてこれを示唆したに留まっていて、しかも多品種の生産組み合わせなど、さまざまな生産制約を現実的立場から考慮しているので、生産管理の型としての基本的性能が明らかにされているわけではない。

ところで、納期延長を考えない一般的な push/pull 型生産管理に関しては、これまで多く研究されている。たとえば、Spearman and Zazanis [17]、Sarker et.al [18]、Siha [19] では、push 型と pull 型の動作比較や、多段工程での挙動についてシミュレーション検討している。また、Hodgson and Wang [20] [21] は、工程ごとの push/pull 型の選択決定を MDP モデルを用いて行い、曹・圓川 [22] や平川ら [23] では、需要変動の大きさと両方式の適性関係を評価した上で、push/pull 型を使いわける Hybrid 方式を研究している。それらはいずれも、変動する未定の需要に基づいて push 型を考えるものである。しかしながら、上記で述べた納期延長のケースでは、注文は確定していて、

納期のみ未定となるので、特に push 型についての確実性の前提が大きく異なっている。そのため、従来の研究範疇からは、その性質を知ることができず、新たな研究が必要である。

本章では、このような「発注納期より確定納期が遅れる」環境下での push/pull 型生産管理方式の性質を一般化し、生産方式選択のための指針を与えることを目的とする。特に、これまで周知されていない、pull 型生産管理方式が適する領域を明らかにする。このために、まず、push/pull 型両方式による在庫量を、納期延長を加えてモデリングする。次に、両方式を比較するために、需要水準の規格化やサービス水準の意味について検討する。その後、シミュレーションによって、納期延長の程度や需要変動の影響などの基本的性質を明らかにした上で、生産リードタイムの関係を検討し、push/pull 型適性判定の方法を導く。そして、比較的単純なケースによって、納期延長の程度や需要変動の影響などの基本的性質を明らかにする。さらに、より現実に近いケースとして多品種生産への適用を考え、切り替え生産のために生産チャンスが限定されるモデルを導入し、その性質を考察する。

3.2 問題のモデリングと定式化

3.2.1 想定環境

3.1で述べた環境を図示すると、図 3-1 に示す関係があり、次のような特徴にまとめられる。

- ・発注納期よりも確定納期が高い確率で遅れる。
- ・発注時点では、発注納期は生産リードタイムよりも充分長い。
- ・確定納期の判明時点から確定納期までの期間は、生産リードタイムより

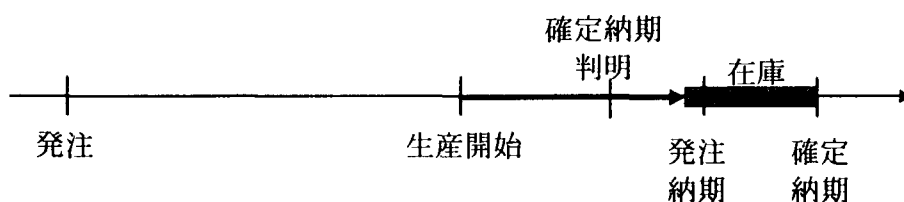


図 3-1 発注納期より確定納期が遅れるモデル

も短く、納期確定後に生産開始することはできない。

- ・確定納期より早く納品することはできない。

本章では、この下に、在庫量について考察する。以下では、

- ・製品在庫のみを在庫として考える。
- ・製造不良の発生を考え、欠品との関連を考慮する。
- ・確定納期での欠品は極力小さくしたいが、欠品となってしまった需要は、出荷しないまま失われる。

ことを想定する。

3. 2. 2 push 型生産在庫

発注納期を i とし、発注納期が i である需要量を D_i とする。確定納期が発注納期より遅れる程度を j とし、その発生確率を P_j とする。すなわち、 D_i の需要のうち、 $D_i \times P_j$ は $i+j$ が確定納期となる。ただし、確定納期は発注納期より早まることはないので、 $j \geq 0$ とする。

全ての需要が発注納期通り生産完了されるとすると、確定納期までの延べ在庫量を I とすれば、

$$I = \sum_i \sum_j j \cdot D_i \cdot P_j \quad (3-1)$$

で表現される。ここで、在庫評価期間を T とすると、式(3-1)うち、 $i+j \in T$ なる需要だけが対象となるから、push 型在庫 I_{push} は、

$$I_{\text{push}} = \sum_i \sum_{\substack{j \\ i+j \in T}} j \cdot D_i \cdot P_j \quad (3-2)$$

である。

3. 2. 3 pull 型生産在庫

pull 型生産では、実際に出荷されたという事実に基づいて、補充生産が指示される。納期延長後の確定納期 t における出荷量を S_t とすると、 $t=i+j$ であるから、

$$S_t = \sum_{t=i+j} \sum D_i \cdot P_j \quad (3-3)$$

であり、 S_t は t における生産指示量でもある。ここで、生産リードタイムを L とすると、 L 期前の生産指示量 S_{t-L} が t 期に生産完了されるので、 t 期における在庫量 I_t の増減は、1期前の在庫量 I_{t-1} を用いて、

$$I_t = I_{t-1} - S_t + S_{t-L} \quad (3-4)$$

である。これを漸化式の形で展開すると、第1期の初期在庫 I_0 を用いて、

$$I_t = I_0 - \sum_{k=t-L+1}^t S_k \quad (3-5)$$

となる。ここで I_0 は補充点と考えられ、 I_t は、 L 間の出荷変動だけ補充点から変動する。また、式(3-5)においては、非定常である初期は除外して、 $t \gg L$ となる期のみで在庫評価期間 T を考えるものとする。この時、pull型在庫 I_{pull} は、式(3-3)、式(3-5)から

$$I_{pull} = \sum_{t \in T} I_t = \sum_{t \in T} \left\{ I_0 - \sum_{k=t-L+1}^t \left(\sum_{i+j=k} D_i \cdot P_j \right) \right\} \quad (3-6)$$

である。

3. 2. 4 push/pull型生産在庫比較のスケーリング

式(3-2)、式(3-6)から、この問題の生産在庫は、 D_i 、 I_0 および j 、 P_j 、 L で決定されることがわかる。当然のことながら、 D_i の変動が大きい時は、一定のサービス水準を維持するために、式(3-6)の I_0 を大きくしなければならない。

ところで、 D_i の変動は同じで、需要の絶対数のみ α 倍されるとすると、この時、 I_0 も α 倍すればサービス水準は同じであるから、 $D'_i = \alpha \times D_i$ 、 $I'_0 = \alpha \times I_0$ として、式(3-6)は、

$$\sum_{t \in T} \left\{ I'_0 - \sum_{k=t-L+1}^t \left(\sum_{i+j=k} D'_i \cdot P_j \right) \right\} = \sum_{t \in T} \left\{ \alpha \times I_0 - \sum_{k=t-L+1}^t \left(\alpha \sum_{i+j=k} D_i \cdot P_j \right) \right\} = \alpha \times I_{pull} \quad (3-7)$$

である。また、式(3-2)より push型でも明らかに在庫量は $\alpha \times I_{push}$ である。したがって、push型在庫とpull型在庫の比 PPP(push per pull)を式(3-8)で定義すると、 α は消去され、PPPは D_i の水準に依らない一般化された指標となる。

$$PPP = I_{push} / I_{pull} \quad (3-8)$$

同一条件のもとで、 $PPP > 1$ であれば pull 型の方が在庫が少なく、 $PPP < 1$ なら push 型が優ると判定される。

3. 2. 5 不良品考慮とサービス水準

発注納期が確定している push 型生産では、一見すると、式(3-2)からわかるように、在庫量は負にならず、欠品は起こり得ない。しかし、これは妥当な仮定ではなく、発注納期通りに生産を進めることができたとしても、現実には、必ずある確率で製造不良などが発生する。したがって、需要と直接対応して生産される push 型の場合、その不足分を無視することはできない。これは、生産が順調に行かない場合に指摘されている push 型生産の持つ弱点の一つである。本章では、生産に不良品が伴うものとし、不良の発生回数だけ欠品が起こるとする。

一方、pull 型では、一般的な補充点理論と同じく、式(3-5)に示されるように、補充点 I_0 の取り方が L 期間の出荷量の和より小さければ欠品となる。しかしながら、不良と欠品は直接関係しない。なぜなら、少量の不良品が生じたとしても、たいていの場合に、未だ需要と対応していない在庫を保有しているのので、容易に代替品を出荷でき、欠品を避けやすいからである。本章では、生産に不良は起こるが、欠品は実際に在庫がなくなる時とする。

以下では、このように欠品を考慮することによって、どちらの生産方式においても、サービス水準が等しくなる在庫量同士を比較評価する。また、不良は生産完了時点で判明するものとする。

3. 3 生産在庫シミュレーション

基本的性質を調べるために、単品種生産、単工程生産、切り替えなし連続生産を想定して、3. 2の条件の生産シミュレーションモデルを作成し、push/pull 型在庫量を計算する。生産制限は考えない。

3. 3. 1 需要と生産のモデル

3. 2. 4より、需要 D_i の水準を任意にしても一般性を失わないので、毎日の

平均需要量を 100 とする。それは、平均 5 個のオーダーから構成され、各オーダーは、それぞれ独立に平均 20 の正規分布にしたがう需要量を持つものとする(標準偏差は条件により変化させる)。生産能力制限がないので、生産リードタイム L は、需要量にかかわらず一定とする。各オーダーの発注納期 i の長さは、3. 2. 1 で述べたように、必ず L より大きいことが条件で、一様分布にしたがうものとする。納期が延長される期間 j は、第 2 章を参考にし、いくつかの建築材料業で現実に起こる需要内容を前提として、平均 J の指数分布にしたがうものとする。納期延長期間は、頻度としては延長なしが最多であることが多い。ここで D_i 、 i 、 j は、整数化するために、発生させた乱数の小数部分を切り捨てて用いる。

このような条件の下で、3. 2. 2、3. 2. 3 に示す 2 種類の生産指示をそれぞれ与える。push 型では、発注納期に間に合うよう L だけ早くオーダーを生産リリースし、pull 型では、当日出荷された量を生産リリースする。生産リリースの後で、どちらの生産方式でも、不良の発生を 1% とし、99% の確率で L 日後に生産完了させる。補充点 I_0 は、この条件で、サービス水準が 99% となるように定める。ただし、pull 型生産は補充点方式であるため、不良による生産量不足は L 日後に再度補充指示される。シミュレーションは 900 期間行い、初期 300 期を除いて在庫量を計算する。

3. 3. 2 需要に依存する部分

3. 2. 4 に考慮すべきパラメータを述べたが、そのうちまず、需要に依存するため制御できないパラメータとして、需要 D_i の変動と納期延長 j を考える。

リードタイム L を 4 日としたもとで、 D_i の変動係数を 10~50% に、また、納期延長の平均 J を 0.5~1.5 日に変化させ、式(3-8)の PPP と式(3-2)、式(3-6) による在庫量を求める。結果を表 3-1-1、表 3-1-2 に示す。push/pull 型両方式の在庫量差の平均値に、危険率 1% で有意差のある場合は**を附して示す。

表 3-1-1 基本シミュレーション結果[PPP]

需要 Di の変動係数	平均納期延長 J			
	0.50 日	0.84 日	1.00 日	1.50 日
10.0%	0.72**	1.21**	1.44**	2.15**
25.0%	0.59**	1.00	1.19**	1.77**
50.0%	0.37**	0.63**	0.75**	1.13**

リードタイム L=4 日 : サービス水準 99% : **は 1%有意を示す

表 3-1-2 基本シミュレーション結果[在庫量]

需要 Di の変動係数		平均納期延長 J			
		0.50 日	0.84 日	1.00 日	1.50 日
10.0%	push 型	51.0	85.6	101.5	152.0
	pull 型	70.7	70.7	70.7	70.7
25.0%	push 型	50.9	85.6	101.6	152.0
	pull 型	85.7	85.7	85.7	85.7
50.0%	push 型	51.2	86.6	102.9	153.9
	pull 型	136.8	136.8	136.8	136.8

リードタイム L=4 日 : サービス水準 99% : 平均需要量 100/日

表 3-1 から、J が大きく、変動係数が小さいほど pull 型が有利となる。J が 0.84 日で需要変動係数が 25%の時に、push と pull で同じ在庫量になっていることがわかる。そして、ここを境として、水準によって在庫量が逆転している。たとえば、J が 1.5 日であれば pull 型が優り、0.5 日であったり需要変動が大きければ push 型が良い。

push 型在庫量は、式(3-2)から予想され、また表 3-1-2 に示されるように、ほぼ毎日の出荷量の J 倍になる。pull 型では、式(3-6)よりわかるよう J には影響されず、Di の変動の大きさと共に在庫が増える性質がある。これらの関係があるため、より在庫量が少なくなる生産管理方式が、ケースによって異なることが説明される。したがって、push/pull 型のいずれが優れるのか、この結果によって知ることができる。

また、平均納期延長 J は、わずか 0.84 日の時が分岐点になっていて、1 日程度の J に変化に関して大変敏感であることがわかる。これは、実務上重要な知

見である。なお、 $J=0.84$ とは、納期延長の発生頻度としては、延長なしが過半数で、57%に相当する。

3.3.3 リードタイムLと納期延長の関係

次に、リードタイムLの影響について考える。すぐわかるように、Lはpush型在庫には全く影響しないが、調達期間が長くなるとpull型においては、補充点が高くなり安全在庫が増えるはずである。

Lを1日~2週間に变化させた結果を表3-2に示す。需要変動係数は25%に固定する。表2より、Lを2週間にすると、pull型在庫は、Lが4日の場合の約1.8倍に増えてしまっている。この場合、push/pull型が同じ性能となるのは、 $J=1.5$ 日付近であって、そこまではpush型を選択すべきであることがわかる。逆にLが1日まで短くなると、すべてのケースでpull型がよくなることから、ただし、 $L \ll J$ であれば、確定納期が判明してから生産開始できてしまうので、本章で考える環境には当てはまらなくなる。

表3-2 リードタイムの影響[PPP]

	平均納期延長 J			
	0.50 日	0.84 日	1.00 日	1.50 日
リードタイム L=1	1.07	1.81**	2.15**	3.21**
4	0.59**	1.00	1.19**	1.77**
7	0.45**	0.76**	0.90**	1.34**
10	0.39**	0.66**	0.78**	1.18**
14	0.32**	0.55**	0.65**	0.97

需要 D_i の変動係数 25% : サービス水準 99% : **は 1%有意を示す

3.4 push/pull 型適性判定の一般化

3.4.1 判定尺度

3.3の結果から以下が考察される。pull型在庫量は、式(3-5)から、日々の出荷量 S_k のL日間の和の変動に依存するから、自然な発想として、 \sqrt{L} と強い正相関があると予想できる。一方、push型では、Jに比例しそうなので、このこ

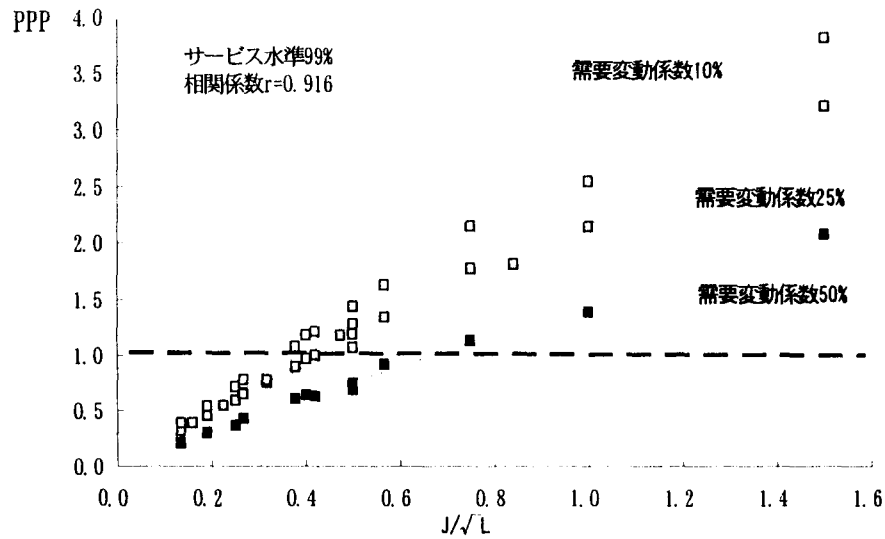


図 3-2 J/\sqrt{L} による push/pull 型判定の一般化

とより、 J/\sqrt{L} を尺度として、表 3-1、表 3-2 の結果を整理できると思われる。その結果を図 3-2 に示す。

図 3-2 では、相関係数は高度に有意となり、 J/\sqrt{L} でうまく説明できていることがわかる。特に、PPP を需要変動係数ごとに層別すると、直線関係が強い。push/pull 型適性判定の分かれ目である $PPP=1$ は、需要変動の程度がかなり違ったとしても、 J/\sqrt{L} が 0.3~0.7 近辺であるという結論を得ることができる。したがって、ある需要が $J/\sqrt{L}<0.3$ であれば push 型生産に適するタイプと判定され、 $J/\sqrt{L}>0.7$ であれば pull 型の選択が勧められる。またあるいは、push 型に適している場合であっても、工程改善などによってリードタイム L を短縮し、0.7 以上になるのであれば、生産方式も pull 型に変更した方がよいことを、図 3-2 から判断することができる。

現実問題への当てはめ方を意識すると、需要変動係数の予測は、 L や J を知ることに比べて、一般的に、はるかに困難であろうから、図 3-2 の判定は、変動係数に対して鋭敏でないことが望まれる。 $J/\sqrt{L}=0.3\sim0.7$ という境界値の中は、変動係数の 10~50% というきわめて大きな変化によってできるものである。この視点で考えると、この中は、 L が 4 日や 7 日のときには、 J の変化では小さく、

1日以内に相当するので、Jについて、より敏感である。したがって、実際に J/\sqrt{L} の値が境界値に近くなるケースは少なく、需要変動係数が多少はっきりしなくとも、ほとんどのケースで明快に判定することができると考えられる。

3. 4. 2 サービス水準の影響

ここまでは、サービス水準を 99%と仮定して議論を進めてきたが、より厳しいサービス水準が要求されることも珍しくない。あるいは逆に、欠品を防止するために何か別の緊急手段があるために、生産のサービス水準は多少低くても構わないこともある。たとえば、損得を無視してオーバサイズ品から切り出す、顧客了解の下に上位機能品を提供する、ことなどが現実に行われている。

これらを考えて、3. 4. 1の結論をより確かなものとするために、サービス水準を 99.5%および 95%として、同様のシミュレーションを行う。その結果を図 3-3、図 3-4 にそれぞれ示す。

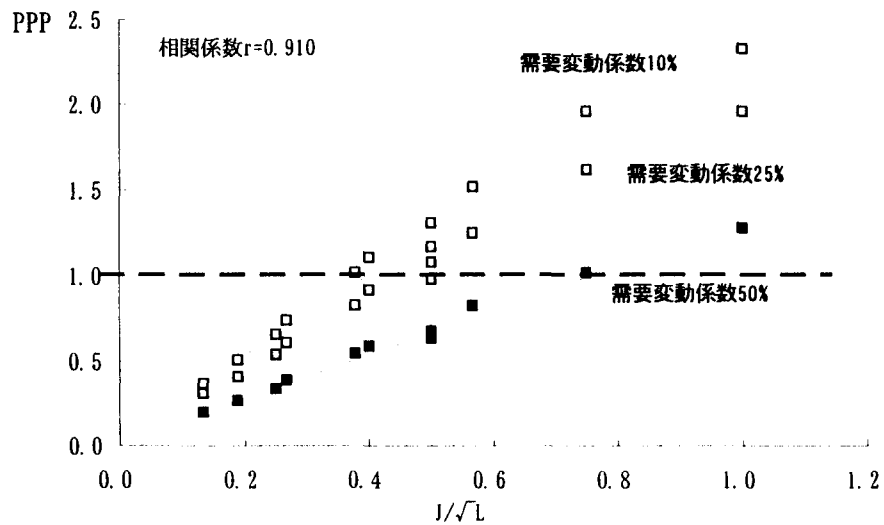


図 3-3 サービス水準 99.5%の push/pull 型適性判定

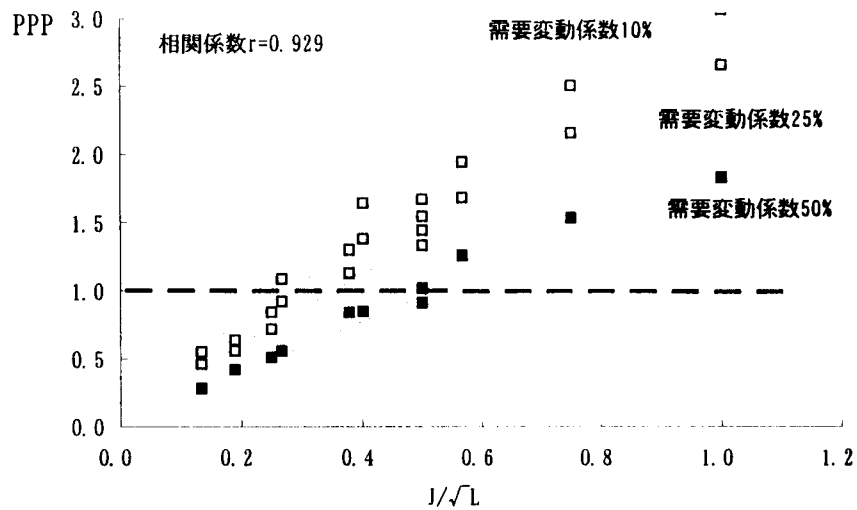


図 3-4 サービス水準 95%の push/pull 型適性判定

図 3-3 では、サービス水準が上がったために、pull 型在庫量が増え、同じ条件で図 3-2 と比べると PPP は小さくなっている。しかし、 J/\sqrt{L} と PPP に強い相関があること、変動係数に対して鈍感であることなど明らかに同じ傾向を持つ結果である。PPP=1 となる J/\sqrt{L} もほとんど変化はなく、0.38~0.75 近辺である。サービス水準を 95%に下げた図 3-4 もまったく同様であって、 J/\sqrt{L} が 0.25~0.55 で PPP=1 となっている。したがって、3. 4. 1で得た push/pull 型適性判定関係は、異なるサービス水準においても成立することが確認され、判定値にも大きな違いのないことがわかるので、有用な判定方法であると考えられる。

3. 5 生産チャンス限定と多品種生産

本節では、多品種生産を考え、3. 4の基本シミュレーションで得られた結果の拡張適用を検討する。多品種生産では、必ず生産チャンスに何らかの制限を受けるので、任意の時点で生産できるとした3. 3の条件は成立しない。

3. 5. 1 生産チャンスを考える理由

生産上の制約には、さまざまなものがあるが、ここでは、素材・部品産業の

多品種生産に特徴的で、実際に多くみられる次の条件を鑑みる。

- ・ 生産品種変更をライン切り替え式で行う。そのため他の品種の生産中は生産できない。
- ・ 外部や前工程からの部品待ちがある。そのため、ある期間生産できないことがある。
- ・ 生産計画をあるタイムバケットに対して行う。そのため断続的な生産指示となる。
- ・ 材料産業では製法上、バッチ生産やロット生産が多い。
- ・ リードタイム L は数日、生産チャンスも数日おき、出荷は毎日であることが多い。

これらを想定すると、図 3-5 に示すモデルを考えることができる。図 3-5 において生産は、サイクル C の間隔でのみ行われる。生産チャンスが限られるため、push 型では、たとえば、図 3-5 の ab 間に発注納期 c のある需要は、 x に生産指示され a で生産完了される。そのため、納期延長がなかったとしても、 ac 間は在庫となる。また、pull 型では、たとえば y で出荷された量はすぐには補充されず、 z まで待って生産開始される。

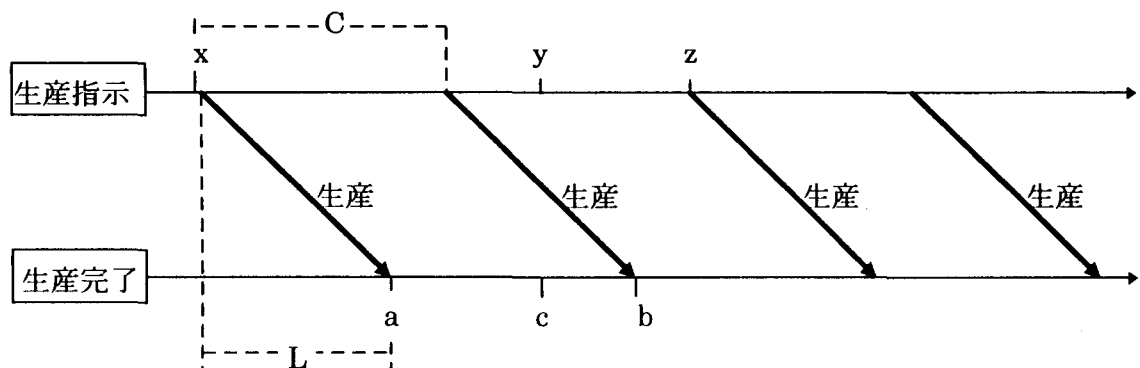


図 3-5 生産チャンスが限られるモデル

L は生産リードタイム : C は生産サイクル

3. 5. 2 断続生産の影響

生産チャンスが限られ断続的になる最も一般的な例として、リードタイム L 間隔で繰り返されるバッチ生産を考える。すなわち図 3-5 で $C=L$ を想定する。3. 3で得た push/pull 型適性判定結果は、バッチ生産されると、どのように影響されるのであろうか。

この検討のため、まず、3. 4の結果より、 J/\sqrt{L} の値に応じて、(i)push/pull 型どちらの生産方式でも在庫量は同性能と判定される需要タイプ、(ii)push 型生産に適すると判定される需要タイプ、(iii)pull 型生産に適すると判定される需要タイプ、の3種を選び、図 3-5 の生産スケジュールに基づくバッチ生産シミュレーションをそれぞれ行う。各需要タイプの具体的内容は表 3-3 に示す。

その結果、(i)同性能タイプでは、PPP の値に変化はなく、バッチ生産してもやはり push/pull 型同性能のままであることがわかった。また、(ii)、(iii)タイプでは、PPP 値は変化するが、push 型または pull 型が有利であるという性質に変わりはない。

表 3-3 バッチ生産による生産チャンス限定の影響[PPP]

需要タイプ	基本モデルにおける判定値 J/\sqrt{L}	L	J	基本モデルの PPP	バッチ生産モデルの PPP
(i)push/pull 同性能タイプ	0.43	7	1.13	1.01	1.01
(ii)push 型適タイプ	0.21	7	0.56	0.50**	0.87**
(iii)pull 型適タイプ	0.63	7	1.68	1.50**	1.15**

サービス水準 99% : **は 1%有意を示す

push 型生産では、バッチ生産によって ac 間分だけ在庫期間が長くなるので、3. 3の基本モデルよりも、期待値として $C/2$ 日相当分の出荷量だけ在庫増加になることは明らかである。pull 型についても平均補充期間が $C/2$ 日増えるのではあるが、しかし、基本モデルとは異なり、在庫量は補充期間の平方根に比例するのではない。なぜなら、 C 間隔でのみ補充され、次のサイクルまでほぼ均一に

減少すると予想されるので、このトレンド分の在庫量分布は、C日分の出荷量を巾とする一様分布に近い形になると考えられるからである。これが、もともと基本モデルに含まれる在庫量変動に複合されると考察される。したがって、pull型においても、平均在庫はC/2日出荷相当分だけ増えると考えられ、結局、PPP=1のケースでは、基本モデル同様の値になることが説明できる。

3. 5. 3 多品種生産への適用

断続生産の結果を基に、多品種生産へ拡張する。図3-5において、2品種A、Bを、1週間ずつ交互に生産するケースをシミュレーションし、多品種問題を考察する。各品種とも、自品種を生産していない期間であっても、毎日出荷されるものとする。A、Bの需要タイプは3.5.2で用いたものとし、表3-4の通り組み合わせる。品種ごとの生産サイクルはともに2週間であるので、どのケースでもpull型在庫量は一定となる。

表3-4 2品種切り替え生産ケース

ケース	品種Aの 需要タイプ	品種Bの 需要タイプ	push型生産 在庫量	pull型生産 在庫量	基本モデル判定 にしたがう多品 種生産在庫量
#1	(ii)push型適 タイプ	(ii)push型適 タイプ	719	758	push型生産と 同じ
#2	(iii)pull型適 タイプ	(iii)pull型適 タイプ	832	758	pull型生産と 同じ
#3	(ii)push型適 タイプ	(iii)pull型適 タイプ	775	758	739

品種A、Bの適性は基本モデル(単品種生産・生産チャンス制限なし)による判定：リードタイム各7日

最初に、3.4の基本モデル結果で2品種A、Bともに、push型(#1)またはpull型(#2)に適すると判定されている需要タイプ同士の組み合わせケースを考える。表3-4から、切り替え生産になると、push型またはpull型への適性は不変であっても、push/pull型による在庫量が接近することがわかる。これは、2品種生産によって、生産チャンスが3.5.2より少なくなるため、push型では納

期延長の影響が相対的に小さくなり、pull型では在庫変動におけるトレンド成分が支配的となるからであろう。したがって、より多品種になると、生産チャンスはもっと少なくなるので、どちらの生産方式にしても、同性能に近づくと考えられる。すなわち、push/pull型選択問題は、生産サイクルCが短いときに最もクリティカルであり、その場合で適性を判定しておけば良いと考察される。

次に、A、Bが、それぞれpush適品、pull適品と判定されている組み合わせケース(#3)を考える。表3-4から、push型またはpull型どちらか一方を生産方式として選択するよりも、A、Bそれぞれ単品種での選択判定にしたがい生産する方が、在庫量が小さくなっていることがわかる。したがって、3.3の基本モデル結果によるpush/pull型生産適性判定は、多様な性質の需要タイプが混ざる多品種生産になっても機能することが示され、実際的な判定方法として有効であると結論できる。

3.6 結論

本章で得られた成果は、以下にまとめられる。

- ・ 建築材料生産にしばしば見られる納期延長問題を、体系的に取り上げ、モデル化した。
- ・ モデルから、生産方式のpush/pull型選択決定によって、在庫量に優劣ができることを示した。
- ・ 実務上発生するわずかな程度の納期延長であっても、push型よりもpull型生産が良くなることを数値例により示した。
- ・ 生産リードタイムについてのシミュレーションでは、リードタイム2週間のときに平均納期延長1.5日でpush/pull型同じ性能となることがわかった。
- ・ これらの結果は、 J/\sqrt{L} を尺度として総括できることを示し、push/pull型選択判定結果を与えた。
- ・ 概ね J/\sqrt{L} が0.7を超えるケースでは、pull型が有利となることを明らかにした。

- ・いくつかの異なるサービス水準においても、ほとんど同じ判定結果が成り立つことを示した。
- ・基本シミュレーションでは、push/pull 型選択判定結果を与え、 J/\sqrt{L} が尺度となることを示し、概ね 0.6 以上となるケースでは pull 型がよいことを明らかにした。
- ・多品種生産への適用を行い、基本シミュレーションによる判定結果は、生産チャンスが限定され、 $C=L$ くらいのバッチ生産になったとしても概ね有効であることがわかった。
- ・push 適品と pull 適品を混合生産するケースについても、基本シミュレーション結果にしたがえばよいことがわかった。

第4章 多工程小量生産のための

再利用型日程計画

4.1 はじめに

小量生産事業は、規模が小さいため生産工程を機械化しにくく、また多工程になりやすい特徴がある。多能工作業が主であれば、一部を複数名作業とすることもあ
るし、使用できる治工具は十分な数がなくても、使い回しできることも多い。その
ようなケースでは、スケジューリングは複雑困難であり、現場まかせの成り行き生
産になりやすい。

小量生産のスケジューリングには、ジョブショップスケジューリングが広く用い
られている。現実の問題に対して、理論的に最適なスケジュールを得ることは極め
て困難であるので、何らかの実行可能解を得るために情報処理を行うことが、近年
の一つの方向となっている。しかしそれらは、数十段以上の多工程や、人手作業の
資源制約があるケースに適するものではない。大規模情報処理力を背景として、オ
ンラインスケジューリングを実現するならば、ソフトハウス主導の複雑なシステム
になってしまい、製造工場では工程変更などに対して維持運用できなくなる懸念が
ある。また、システムができたとしても、良いスケジュールになるとは限らないし、
機械化を進めにくいような工程では、そもそも大がかりなスケジューリングシステ
ムは高価過ぎよう。

本章では、これら問題点の解消を意識して、ある多工程小量生産を例に、再利用
型日程計画を開発実施した結果を、4.2にまず示す。次に4.3では、この方法が適
する場合とその理由について、詳細に検討する。本章では、ジョブショップでも全

本章の内容の大部分は、文献 [24] に基づいている。

くの1個生産は対象としない。小量を生産するプロダクションジョブショップが、現実として一般的である〔4〕。

4.2 多工程生産事例

4.2.1 工程概要

航空機用加工硝子生産を事例とする。生産所要期間は数週間から数カ月あり、約10機種を期間をおいて小量反復受注することが多い。見通しを良くするため、開発対象の中で最も工程の短い機種について、加工手順を作業工数や必要人員・治工具とともに表4-1に示す。表4-1-aにおいて、たとえば第4工程は2名作業であって、治工具J2を必要とし、1枚あたりの加工時間は0.4である。また、人員・治工具数と勤務時間は、表4-1-bに記す通りである。2人の作業者が独立に同工程を作業できる場合には、サーバ数を2としている。

この工程をスケジューリングするためには、標準的なスケジューリング問題で採り上げられていない以下の現実的な面を考えねばならない。

- (1) 多能工作業であること、しかも1名作業と2名作業が混在すること。
- (2) 1枚ずつ加工する工程と2枚まとめてバッチ加工する工程が混在すること。
- (3) いくつかの工程で共通治工具を使うこと、しかも治工具は数が限られていて、ジョブ間や工程間での使い回しが重要であること。
- (4) 連続する数工程にわたって作業時以外にも使用する治工具があること。たとえば、型枠・専用容器・恒温槽やその治具などのことで、以下では、それらを容器型治具と呼ぶ。
- (5) 理工程では作業接続時間が制限されること。そのため作業者は、時間になれば止むを得ず他工程作業を中断して、継続作業(工程8～14)に取りかかること。
- (6) 休憩時間に作業を中断すること。しかし、あとわずかな時間でそのオペレーションが完了する場合には融通が利き、休憩時間へ多少食い込んでも、あるいは残業してでも仕上げてしまうこと。

表 4-1-a 工程条件

	工 程 名	工数(1)	必要人員	ロット(2)	加工型治具(3)	容器型治具(4)	接続時間(5)	サーバ(6)
1	前加工準備	0.50	1	1				2
2	前加工 1	1.50	1	1	J1			2
3	前加工 2	1.50	1	1	J1			2
4	前加工 3	0.40	2	1	J2			1
5	前加工 4	0.25	1	1	J3			1
6	熱処理準備 1	0.35	2	1		J4		1
7	熱処理 1 (7)	0.20	1	1			0	1
	CURE1	0.66	0	1			0	1
8	熱処理 2	0.05	1	1			0	1
	CURE2	0.28	0	1			0	1
9	熱処理 3	0.05	1	1			0	1
	CURE3	0.28	0	1			0	1
10	熱処理 4	0.05	1	1			0	1
	CURE4	0.28	0	1			0	1
11	熱処理 5	0.05	1	1			0	1
	CURE5	0.28	0	1			0	1
12	熱処理 6	0.05	1	1			0	1
	CURE6	0.28	0	1			0	1
13	熱処理 7	0.05	1	1			0	1
	CURE7	0.28	0	1			0	1
14	熱処理 8	0.05	1	1			0	1
	CURE8	9.00	0	1				1
15	熱後処理 1	0.60	2	1				1
16	前検査 1	0.30	1	1	J3			1
17	前検査 2	0.50	1	1	J6			1
18	後加工 1	0.35	2	1	J2			1
19	後加工 2	0.30	1	1				2
20	熱処理準備 2	2.00	1	1		J7		1
21	熱処理 9 (8)	1.00	1	1			0	1
	CURE9	9.00	0	1				1
22	熱後処理 2	1.00	1	1				1
23	片づけ	0.50	1	1				2
24	後検査 1	2.00	1	2				1
25	後検査 2	0.25	2	2	J6			1
26	後検査 3	1.00	1	2	J6			1
27	後検査 4	1.25	1	1				1
28	最終加工 1	1.50	1	1	J1			2
29	最終加工 2	1.50	1	1	J1			2
30	最終加工 3	0.30	1	1				1
31	最終加工 4	0.30	2	1	J2			1
32	最終加工 5	0.30	1	1				2
33	片づけ	0.20	1	1				2

- (1) 1枚あたり作業時間 hr/枚 (2) 1回作業枚数。指定数得るまで作業できない。(3) 作業時だけ必要な治具
 (4) 数工程にわたり作業待ち中も含めて必要な治具。コンテナ・型枠・炉・冷蔵庫など。
 (5) 次工程までの接続時間。0の場合は直ちに次工程を開始し、必要資源は他工程を中断して確保する。空欄は制限なし。
 (6) 同時併行作業可能数 (7) 安全確認のため、午前中に作業する。(8) 同じく、午後休憩前に作業する。

表 4-1-b 配置資源

人員：2名	作業時間	8:40-11:40	12:30-14:50	15:20-17:10
治具：J1は2個、他は各1個				

要するに、順序付け以前の問題として、人員と治工具を各工程で的確に割り当てないと、工程干渉を引き起こしジョブは進行せず、手待ちなどのロスが多発してしまう。したがって、良い作業組み合わせ手順を見つけることが本質である。

他機種でも、考慮する条件種類はおおむね上記と同じであるが、最長約500段工程に及ぶ。

4. 2. 2 スケジューリング

4. 2. 2. 1 スケジューリングの目的

小量生産では、自動設備を多く配備できるはずもなく、ほとんどの工程は人手を伴う作業であろうから、製造コストを下げるための重要要因は人件費であり、スケジュール作成の目的は、納期管理以外に、作業員が直接生産作業をする時間を最大化することである。以下では、この時間の生産総所要時間に対する比を「直工率」と呼ぶ。

4. 2. 2. 2 スケジューリング法

多工程スケジュールリングは、工程の分岐・合流が多い場合には、PERTなどのネットワーク手法が用いられるが、表1のような工程構成では、ディスパッチング法以外は考えにくい。それにしても相当難しい問題であって、人・治工具など複雑な制約の多い事例は報告がない。生産工場として現実規模の問題を扱うためには、計算量を小さくしなければならない。

そのための第一の方策として、同時ディスパッチング対象を多機種(表4-1のような構造を複数種類)とすることを避け、同一機種品の複数ジョブに限定する。その根拠は、型や容器などの治工具が、機種ごとに専用化していることが多く、治工具の使い回しは、同一機種間で取り合いを考える構造になっているからである。もちろん、作業場所や工作機械などには、全機種共通のものもある。しかし、多工程小量生産では、工程を基準として考える稼働率は低く、この例では10%未満であるので、異機種間の日程計画を後から組み合わせても、その制約を満足できると判断するからである。

第二の方策は、ディスパッチングには納期を含めないで、いわばオフライン的な日程計画とすることである。たとえば有名なJohnsonの順序付け法も納期と言う概念を持っていないし、FCFSのような優先順位ルールにもない。納期を考慮しないならば現実問題のスケジューリングを解決しない、と短絡的に考えてはいけない。

この2つの方策を共に用いた下で、表4-1の工程を4.2.1の全ての条件を満足するようモデル化し、生産シミュレーションを行った。図4-1に示すアニメーション画面を見ながら、工程進行が思い通りになるまでディスパッチング優先順位を適宜変更しやり直す、というチューニング作業を数十回繰り返す。たとえば8ジョブの場合、14日で生産完了できた。その結果を日程計画として作成する。一部を作業人別に表4-2に示す。最適である保証はないが、まだ、13日以内で終了させる手順を発見していない。直工率の最大化を目的とするが、資源制約のため、10%程度は手待ちを避けられないことがわかった(注1)。

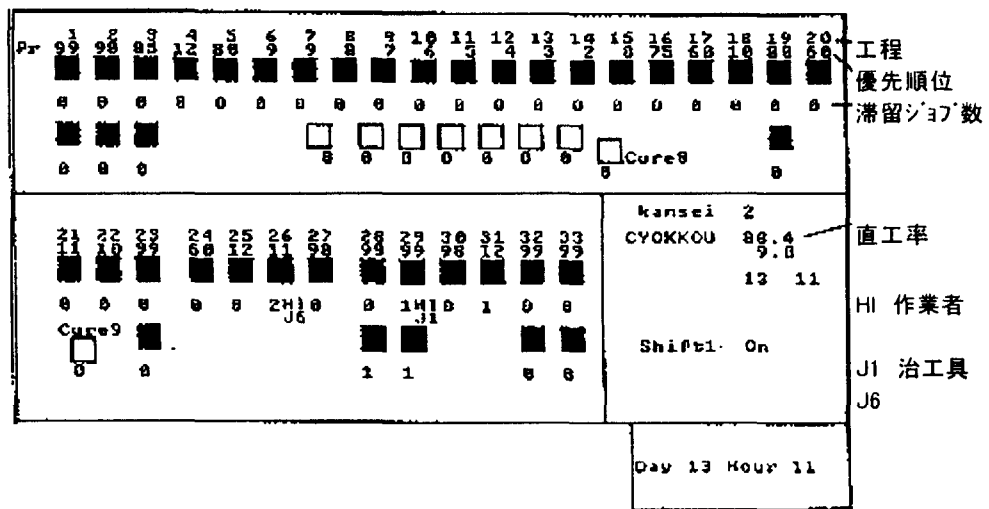


図 4-1 工程モデル画面

作業員 2 名、8 ジョブ 生産で生産開始から 13 日目午前 11 時の状態。作業員は、第 26 工程(2 枚バッチ生産)と第 29 工程で 1 名ずつ、それぞれ治工具 J6 と J1 を用い作業している。第 28, 29, 31 工程に加工待ちジョブがある。残り 2 ジョブは、既に完成している。作業員は、優先順位数字のより小さい工程のジョブを次に選択するものとして、全ジョブが完成するまで時間を進めてゆく。

表 4-2 作成した日程計画表の第 2 日目

作業者 A

DAY	TIME	工程名	開始	終了
2	8:40	7 熱処理 1	開始	
2	8:52	7 熱処理 1		終了
2	8:52	1 前加工準備	開始	
2	9:22	1 前加工準備		終了
2	9:22	2 前加工 1	開始	
2	9:32	2 前加工 1		中断
2	9:32	8 熱処理 2	開始	
2	9:35	8 熱処理 2		終了
2	9:35	2 前加工 1	再開	
2	9:52	2 前加工 1		中断
2	9:52	9 熱処理 3	開始	
2	9:55	9 熱処理 3		終了
2	9:55	2 前加工 1	再開	
2	10:58	2 前加工 1		終了
2	10:58	3 前加工 2	開始	
2	11:40	3 前加工 2		休憩
2	12:30	\$\$\$ 4 前加工 3	開始	
2	12:54	\$\$\$ 4 前加工 3		終了
2	12:54	\$\$\$ 4 前加工 3	開始	
2	13:18	\$\$\$ 4 前加工 3		終了
2	13:18	3 前加工 2	再開	
2	14:06	3 前加工 2		終了
2	14:06	2 前加工 1	開始	
2	14:50	2 前加工 1		休憩
2	15:20	2 前加工 1	再開	
2	15:33	2 前加工 1		終了
2	15:33	3 前加工 2	開始	
2	17:03	3 前加工 2		終了
2	17:03			手待ち

\$\$\$は2名作業を示し、作業者AとBで同じスケジュールになっている。資源制約のため、Aは17:03以降作業できるジョブがなくなり、手待ちになる。しかしBは、17:40まで作業(残業)する。また、熱処理工程のため、たとえばAは、9:32に前加工1を中断している。

作業者 B

DAY	TIME	工程名	開始	終了
2	8:40	3 前加工 2	開始	
2	10:09	3 前加工 2		終了
2	10:09	1 前加工準備	開始	
2	10:11	1 前加工準備		中断
2	10:11	10 熱処理 4	開始	
2	10:14	10 熱処理 4		終了
2	10:14	1 前加工準備	再開	
2	10:31	1 前加工準備		中断
2	10:31	11 熱処理 5	開始	
2	10:34	11 熱処理 5		終了
2	10:34	1 前加工準備	再開	
2	10:45	1 前加工準備		終了
2	10:45	2 前加工 1	開始	
2	10:52	2 前加工 1		中断
2	10:52	12 熱処理 6	開始	
2	10:55	12 熱処理 6		終了
2	10:55	1 前加工準備	開始	
2	11:11	1 前加工準備		中断
2	11:11	13 熱処理 7	開始	
2	11:14	13 熱処理 7		終了
2	11:14	2 前加工 1	再開	
2	11:31	2 前加工 1		中断
2	11:31	14 熱処理 8	開始	
2	11:34	14 熱処理 8		終了
2	11:34	1 前加工準備	再開	
2	11:47	1 前加工準備		終了
2	12:30	\$\$\$ 4 前加工 3	開始	
2	12:54	\$\$\$ 4 前加工 3		終了
2	12:54	\$\$\$ 4 前加工 3	開始	
2	13:18	\$\$\$ 4 前加工 3		終了
2	13:18	5 前加工 4	開始	
2	13:33	5 前加工 4		終了
2	13:33	2 前加工 1	再開	
2	14:50	2 前加工 1		休憩
2	15:20	2 前加工 1	再開	
2	15:42	2 前加工 1		終了
2	15:42	1 前加工準備	開始	
2	16:12	1 前加工準備		終了
2	16:12	2 前加工 1	開始	
2	17:42	2 前加工 1		終了

表4-2は、この機種を生産する時には何回でも用いることができる再利用型日程計画である。このようにして作成される、ジョブ数と期間が区切られた日程計画を現場では、「カセット」と呼ぶことにした(注2)。

4. 2. 3 現場実施

4. 2. 3. 1 これまでの作業指示

これまでこの現場では、細かな日程計画はなく、大きな意味での製品納期を考慮しつつ、その場その場で作業できる(治工具や人員の制約を満足する)ジョブを捜し

出していた。これが、多くの手作業生産の実態ではないであろうか。

人員や治工具に制約が多いから、ある意味で、作業員が次作業を何にするのか選択する方が便利な面もある。しかし、その選択を考えるための工数が大きくなる問題があった。仮に最善の選択ができたとしても、それでは無駄な工数が発生する。また、作業速度を次の希望作業に合わせ調整してしまうこともあった。たとえば、次に2名作業を行いたい時は、1人だけ先に手空きになっても待つだけであるので、もう1人の作業員の作業終了に合わせてしまうことなどが見受けられた。結果として、直工率が望ましい値になりにくかった。

4. 2. 3. 2 試行

注文数と納期を考えた上で、適切なカセットを実行した。幸いなことに大きな問題もなく作業を進められた。すなわち、計算した通りの直工率を達成できたことになる。

実際にかかった工数を集計してみると、予想外のことであるが、日程計画に用いたこれまでの長い期間の実績から算定した標準工数が、20～30%も削減されていた。作業方法は全く変更していないので、細かな日程計画を事前明示したことにより、上述したような無駄な工数が削減されたと考えている。これは、日程計画作成による素晴らしい副産物である。

4. 3 考察

4. 2で実施したアプローチについて、方法論としての特徴と優位性を検討する。

4. 3. 1 再利用型日程計画について

4. 3. 1. 1 中日程計画と小日程計画の順序

個別生産におけるオーソドックスな生産計画法は、納期の設定にあたって期間山積み計画のような中日程計画を行い、次に表4-1のような手順表から基準日程を作成し、その後、納期にしたがう負荷計画を作成し、最後に小日程計画を作成する手順である〔25〕。これは、基本的には、ある期間における注文量と生産能力の合

計がバランスしていれば、細かな日程作成は後回しにしても、大きな矛盾に至らないという立場である。それに対し本章では、小日程計画を納期に無関係な状態で作っている。その根拠を以下に検討する。

山積みや負荷計画では、人員や治工具の取り合いを考慮しないが、多工程生産であったり資源制約が強い場合には、工程進行具合と完成期日を推定することは至難の業である。小日程計画を作っていない段階では、たとえば表4-1工程の直工率が、90%にしかならないと判断できるものではなく、したがって、精度の良い中日程計画を作ることは困難である。

仮に、適切な納期設定がなされる中日程計画が得られ、それにしたがう最適日程が、何らかの方法で見つかったとしよう。しかし、それは、中日程計画の制約を満たす実行可能な手順の中で、相対的に最適なかただけであって、収益が出せるほど高い直工率を約束するものではない。逆に運が悪いと、中日程計画で予定される数量では、どう組み合わせても満足できないケースも生じるであろう。

図4-2に示す問題は、このことを示すための人工的な例である。与えられた数量を生産する間、2人配置すると仮定すると、ジョブ数が10以内では直工率は最大85.1%までしかならない。また、数量が増えれば単純に直工率が高くなるというものでもなく、たとえば、3枚生産は2枚生産よりも、6枚は5枚よりも直工率が悪くなった

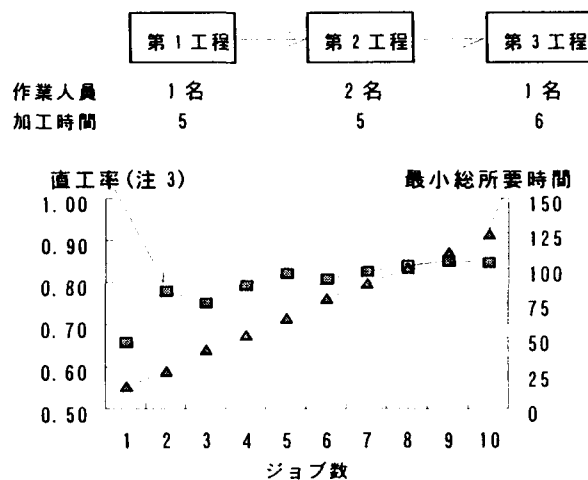


図 4-2 3 段工程・配置人員 2 名の人工問題

ていて、こんな単純な工程であっても、その挙動を把握するのは決して簡単ではないことがわかる。実際の工程で、小日程計画を作る時にこのようなことがわかって、もはや対処できないのではないか。

それにもかかわらず、多能工による小量生産事業の多くでは、不景気などで受注量が減ったとしても、とにかく直工率を落とさず収益を出すことが事業存続のために肝要なのである。したがって、直工率が保証できない以上、先に中日程計画を作ってしまう手順は、必ずしも良いとは言えない。

4. 3. 1. 2 緩衝機能

複雑な資源制約のある時、工程干渉によるロスを避けるための常套手段は、緩衝機能としての仕掛かり在庫を持つことである。本章では、計算モデルを簡素化するために、カセットを機種工程ごとに作ることにしたが、中日程計画に含まれる全機種を考える場合よりも、扱うジョブ数が少なくなるので、緩衝機能の観点から考えると不利な面があるかもしれない。

しかしながら、小量生産の場合、仕掛かり在庫とするほど生産数がないならば、本質的にこの戦略自体がうまく機能しないであろう。このような手作業の場合、緩衝機能は、仕掛かり在庫に頼るよりも、むしろ残業やフレックスタイムなどの勤務時間にすることが考えられよう。本章の方法では、予め作成された小日程計画にできるだけ沿う形で、見通しを持って勤務時間を設定できるので、良い緩衝機能になると考えている。従来の中日程計画方法では、資源制約の都合で、たとえば1週間先に長い手待ちができることなどわからず、勤務時間調整は実施しにくいのが実状であろう。

4. 3. 1. 3 設計する日程計画

多工程小量生産は、納期と数量のバリエーションが小さく、生産計画は、いつも似たものとなりやすい特徴がある。場合によっては、生産計画がなくとも、習慣的に、いつ頃第何工程を通過するのか大まかなことは推測できることもある。そのように類似する生産計画であれば、毎日毎日作成するのは果たして効率的であろうか。

立場を代えて、商品設計や製造試作部門を考えてみると、そこでは、1機種ごとに作業を完了する。それに対して、生産計画部門は常に運用的であって、いつになっても手が放れない。しかし、治工具設計や作業方法(1名作業か2名作業か)決定を含む作業手順計画は、試作業の範囲であることも多く、それによって資源制約が決まり、小日程計画後の最大直工率も決まってしまうことを考えると、直工率を高くするためには、日程計画も設計する方がふさわしいのではないか。

本章で提案する再利用型日程計画は、予め作成しておけるので、原案(多工程のため数週間分になる)のデザイン・レビューを行うことができ、そのため品質の高いスケジュールとして完成できる。作業者はこの過程で手順が頭に入りやすく、したがって、無駄な動作が減り、4. 2. 3. 2のような工数削減が実現されると考えられる。また、同じ日程計画を繰り返し使うのだから、作業手順に習熟効果も期待できよう。さらに、作成過程で生まれてくるいろいろなアイデア、優先順位変更の効果、あるいは治工具やサーバの増加(投資)など設備シミュレーションの効果も取り入れやすい。

4. 3. 1. 4 日程計画のオフライン化

現在の技術水準では、多工程や複雑な資源制約に対応し、かつ各ジョブの納期を考慮するスケジューリングシステムは困難であると先に述べた。しかし、情報処理力は飛躍的に進歩しているので、最適化ロジックのないシミュレーションベースであれば、実現されるかもしれない。しかしながら、オンライン型であるとする、その場で小日程計画を決定しなければならないわけである。生産計画担当者には、直工率など何らかの尺度をより良くするために、実際にシミュレーション機能を使うだけの暇があるのであろうか。複雑な資源制約を満足する実行可能解が、一つでも見つかったならば、そのままになってしまうのではないか。

一般的な認識として、これまでのオンラインスケジューリングシステムでは、順序付けが重要とされるケースを考えることが多かったので、全ジョブを納期に遅れないよう配置できれば、ともかくはそれで構わないというパラダイムが成立していた。しかし、4. 3. 1. 1で述べたように、資源制約の強い小量生産では、充分吟味

された解でなければ実用性がない。この意味で、コンピュータが高速化されるとしても、従来型パラダイムのまま安易に小量生産に持ち込むことは危険である。

本章では、直工率が明示された、数量や機種異なる何種類かのカセット小日程を用いることによって、中長期における直工率を事前にコントロールする戦略を考えている。これによって、納期を満足させることに對し、意思を持って収益が設計できるようになる。

4. 3. 1. 5 提案する方法の適用限界

小日程計画を予め作成する方法の利点を述べてきたが、これが成立するためには、何種類かのカセットを組み合わせ並べるだけで、納期と数量を満足できることが条件である。小量受注生産では、どんなスケジューリング法を採用するとしても、顧客との間で数量納期を調整するのが普通であるから、この意味で提案する方法は採用しやすい。カセットを並べて行けば、受注時の納期回答に用いることもできよう。しかし、納期調整の余地がなく、単に顧客提示納期によって受注選択をする場合、あるいは特急生産が頻発する場合などでは、この方法は不向きであろう。

また、カセットを組み合わせるとしても、カセット間が隙間なく埋まる必要がある。カセット内において高い直工率となっても、カセット間は全くの手待ちになってしまうならば、中長期稼働率は思うほど高くなるまい。そうならないようカセット間の隙間に、たとえば、治工具整備や安全教育QC活動など直接作業以外の業務、あるいはフレックスタイム利用などを予定できることが、実際面での適用条件である。

さらに、小日程計画が向こう数週間分予め決められているのであるから、万一の工程トラブルや作業の遅れがあると、カセットは破綻する。そうなっても、いずれカセット上の日時に復帰できることも条件である。もちろん、オンライン型の生産計画であっても、こんな場合には、やはり対応が難しいことには変わりない。人手作業でジョブ数が少ない場合は、たとえば、残業やハイペース作業などのやりくりがフレキシブルになされやすく、本章の方法に向いている。

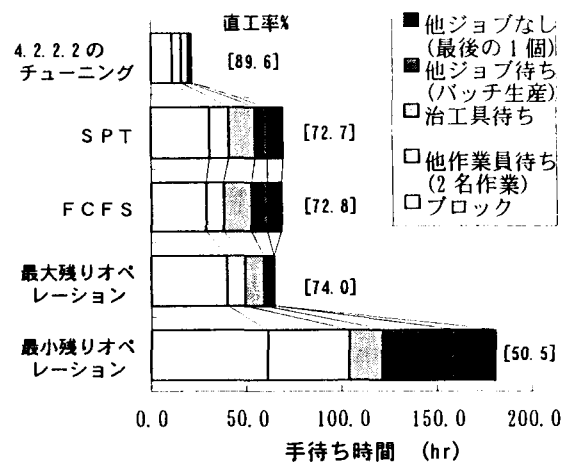


図 4-3 各種優先順位ルールによる比較

4. 3. 2 資源制約がある場合のディスパッチング

4. 3. 2. 1 標準的な優先順位ルールとの比較

全てのオペレーションが多能工作業であるならば、直工率最大化と平均フロータイム最小化は、明らかに同値である。SPTルールは、多くの場合に、平均フロータイムを最小化することが知られているが、資源制約のあるケースにおいてはどうか。広く知られている優先順位ルールによって、実際に表4-1工程をスケジューリングする。その結果を、作業員が手待ちとなる理由内訳で分類し、図4-3に示す。4. 2. 2. 2でチューニングした優先順位が最も優れ、SPT、FCFS、最大残りオペレーション順は、ほぼ同じ直工率であった。

図4-3から、複雑な資源制約のある場合には、優先順位を特別にチューニングする効果の大きいことがわかったので、以下の節で、この方法について考察する。

4. 3. 2. 2 最適性に関するこれまでの研究

最適スケジュールを得る順序付け理論の構築は、困難であることが知られている。たとえばGupta [26]によれば、2段工程以上のフローショップが複数サーバで

あれば、組み合わせはNP-complete問題になってしまう。そのため近年でも、理論的研究の多くは工程規模を限定し、しかも、何らの資源制約も考えない段階にある [27] [28] [29] [30]。

表4-1工程は、資源制約と複数サーバを含む33段工程であるので、それら研究成果を取り入れられるケースではない。しかし、究極まで高い直工率の追求に固執するものではないが、少なくとも勘と経験の世界からは脱却したい。それゆえに、手段として、工程シミュレーションモデルの作成によって、優先順位をチューニングすることとした。

離散型シミュレーションは、主に初期設備導入と日々の操業スケジューリングツールとして、数十段工程においても実践されている [31]。本論では、日程モデル作成のため、強い資源制約部分だけに用いており、初期と日々の中間頻度の用途として発展する分野であろう。

4. 3. 2. 3 ディスパッチング法の限界

従来研究されているジョブショップスケジューリングのほとんどは、工程(機械)に空きがある限りジョブが加工できる前提であって、多能工生産や治工具が考慮されることは少ない。平林ら [32] は多品種間の共通工具について、FMSを想定して、工具を予め機械へ配分する問題を検討しているが、使用していない治工具は作業員が自由に使い回しできる、とする本論の場合とは状況が異なる。

ところで、複数多能工を必要とする場合のディスパッチングについて考えてみよう。たとえば、ある工程へ2人を割り当てるためには、まず、2人が同時に手空き状態にならなければならない。しかし、1人が手空きになり2人目を待っていても、その間に他の1名作業が発生してしまうと、待っている1人はそちらへ割り当てられてしまい、結局2名作業であるオペレーションは、なかなか実行することができない。これは、近将来のために資源やジョブを使用せずにとっておく、とすることができないディスパッチング法の原理的な問題である。これを解消するため、4. 2. 2. 2では、休憩時間を計算することで、2人とも手空きの状態を作り出し、実行させた。現実的にも、休憩直後が、確実に2人確保できるタイミングである。

容器型治具の計算にも工夫が必要である。数工程にわたって、非加工時においても占有されるのだから、オペレーションが完了すると解放されるジョブ、作業員並びに加工型治具とは別に、その使用を計算しなければならない。

多能工作業をディスパッチングするならば、工程にジョブをディスパッチングするのでなく、稼働率を高くしたい作業員に、ジョブをディスパッチングする方法も考えられる。しかし、多工程であると、相当数のジョブ先行関係を考慮しなくてはならず、計算量が減少するものではない。

これらはいずれも、単純なディスパッチング法の限界であると考えている。

4. 3. 2. 4 中間バッファ

4. 2. 2. 2のモデルにおいて、中間バッファを設けず、ある工程にジョブが滞留していれば他のジョブはブロックされ、その工程に進めないこととした。したがって、緩衝機能が働かず、図4-3に示すようブロックを理由とする手待ちが、多く発生してしまった。しかしながら、バッファを設けるとしても、全ての工程間にバッファを認めては、仕掛かりが無秩序になり、現物管理が困難である。また、どこにどれだけ設けるべきか、明らかにされている訳でもない。

これまで、多段フローショップは、十分な中間バッファを持たないと、最初の数工程のうちにラインバランスが悪くなってしまうことが報告 [33] されている。また、工程間共通バッファの設定方法について研究 [34] されている。その他、バッファサイズの検討例は数多い。しかし、ほとんどの研究は、フローショップの第1工程に、ジョブを無限供給させる前提で、時間に関する定常状態を評価するものであり、そのため小量生産に関する知見となっていない。バッファを認め選択肢を多くしても、適切なスケジュールのない状態では、4. 2. 3に述べたように、実際に直工率が良くなることもあるので、その点も含め、今後さらに研究が必要である。

4. 3. 3 現場改善との関係

本章では、複雑な資源制約があることを前提として、日程計画法を論じてきたが、

決して、2名作業などがあること自体を、正当化するものではない。生産工程をもっと単純化し、スケジューリングも、順序付けを考えるだけで済むことが望ましい。しかし、複雑な資源制約のある生産現場であれば、実際問題として、工程を表4-1の形にまで整理するだけでも容易ではなく、なかなか改善は進まない。

作業改善の標準的手段であるタイムスタディは、何回かの作業観測を基礎とする。多工程小量生産では、たとえば数ヶ月に1回しか行われたい作業も珍しくないのに、短期間では、十分な観測機会を得られない問題点がある。

それに対して、4.2.2.2で用いたスケジュールは、生産計画に起因する作業者の手待ちロスを省くことに主眼があり、個々の作業方法改善とは原理的に別物である。しかしながら、4.3.1.3に述べたように、再利用型日程計画にすれば、その作成過程で何らかの作業改善を取り入れやすい効果が期待できる。本章の方法によって、4.2.3.2では、実際に工数が削減した。それを定着させるために、次回製造までに、削減された工数を用いるカセット日程計画に書き換えた。このような、実施-カセット修正のサイクルを繰り返す進め方を、表4-3に示す。

すなわち、生産計画ロスの削減は、早期にある程度の作業改善効果をもたらすので、それを達成してから、さらなる作業改善に努める順が、現実として有利ではないかと考えている。

表 4-3 再利用型日程計画の進め方

	ステップ 1	ステップ 2	ステップ 3	ステップ 4
手順	工程モデル作成	カセット化 試行 工数集計	カセット改良 実施 工数確認	将来用カセット
目的	現工程確認	日程手順の明示 直工率の事前プログラム	高い直工率の標準化 生産数バリエーション	工程改善効果予測 中間在庫研究 優先順位研究
工数	従来標準工数	工数削減	低工数定着	発生余力取り込み
工程	現在の工程制約			各種改善案

4.4 結論

本章では、多工程少量生産に適する生産計画方法として、再利用型日程計画を提案し実施した。

その結果、以下の結論を得た。

- (1) 数十段以上の多工程で、2名作業や容器型治具などの複雑な資源制約がある場合にも、ディスパッチング法によって、矛盾のない日程計画を作成できた。
- (2) 作業結果あるいは生産計画結果として、直工率が成り行き決定されてしまうことなく、所望の直工率を、事前に意思を持ってコントロールすることができた。
- (3) 次作業ジョブを選んだり、治工具や必要人員を確認する必要がなくなった。また、作業者自ら日程計画を吟味できるようになった。そのため、生産工数そのものが減少し、トータルとしての生産性が向上した。

本章で提案する方法の本質アイデアは、

- (1) 納期を含まない小日程計画を設計し、事前吟味し、それを中日程計画に利用すること。
- (2) スケジューリング対象を限定し、資源制約がある場合のディスパッチングを合理的に行うこと。

であることを明らかにし、適する場合とその限界を検討した。

(注1) この機種の開発初期の値である。

(注2) シミュレーションモデリングにはWitness(AT&T ISTEEL製)を使用した。ノウハウの蓄積した後では、より長い工程であっても、製造スタッフが1機種のモデリングからカセット作成までを、約2週間で完了することができた。1回のシミュレーション実行時間は、当時の新鋭機であった486パソコンで30秒以内である。

(注3) 図4-2の問題では、1個あたり作業工数が21であり、2人配置であることに注意すると、ジョブ数をnとして、

$$\text{直工率} = (21 \times n) / (2 \times \text{総所要時間})$$

である。総所要時間は全列挙して最小値を求める。

第5章 結

5.1 本論の成果

本論では、現実に存在する生産管理問題をシステムティックに分析し、そこから導かれる原理を考察することによって、生産管理の方式とスケジューリングを、実証的側面から一般化するための研究を行なった。そのために、生産システムをモデル化することの有効性を実証することも目的とした。

本論によって、以下の成果を得た。

まず、第2章では、建築材料生産のモデリングを行い、組み合わせ制約のある多品種変量受注生産において、生産上の制約をモデル化した上で、シミュレーションを展開し、生産計画期間の長さで見込み生産比率をパラメータとして、生産方式の設計指針を提案した。すなわち、在庫量、納期余裕、品種組み合わせ効率などトレードオフ関係にある要請は、スケジューリングを純粋な順序付け問題として扱うのではなく、各期のスケジューリング対象集合の選択が変化することによって、大きく影響されることを明らかにした。さらに、生産完了後の顧客による契約納期の延期に対処する方法として、継続生産品の一部を見込み生産とする方式を検討し、有効に生産方式が設計実現されることを導いた。

第3章では、この結果を深く考察し、受注生産でありながら、発注納期は絶対のものではなく、延期されるかもしれないという構造において、生産管理方式としてpush型とpull型をモデル化し、在庫量の少なくなる方式を選択する方法を研究した。建築材料業を始めとして工事を伴う事業では、発注納期が延期されることは、日常的に見られ、また、この構造にあてはまる事業は決して少なくないので、納期延期への対応策としてpull型生産が用いられるならば、その意義は大変大きいものである。

需要変動の大きさ、納期延期の程度、生産リードタイム、バッチ生産の影響などをシミュレーションによって検討した結果、納期延期期間が少なく 1 日以下であっても、条件によっては pull 型生産の方が優れることがわかり、一般的な結論として、push 型または pull 型生産管理のいずれが適するかという性質は、納期延期の程度と生産リードタイムによって簡単に判定できることを解明した。また、pull 型生産におけるサービス水準と不良品再生産の関係を考察した上で、この適性判定は、さまざまなサービス水準や需要変動においても、概ね同じ関係として得られることを示した。

第 4 章では、人手作業を中心とする小量生産の加工ガラス生産をモデリングし、数十段以上の多工程や、複数の作業者と治工具を同時に組み合わせる現実的なジョブショップスケジューリングにおいて、手待ちロスの少ない日程計画を作成した。単純ジョブショップ過程でないならば、スケジューリングはきわめて難しいため、小日程計画を研究対象とすることは、ほとんど考えられてこなかったが、本論では、このような多工程小量生産に適する日程計画として、実践運用も含めた観点から研究して、再利用型日程計画を提案した。そして、その作成方法と効用について実証した。この本質は、納期にとらわれなく日程計画を設計することと、複雑な組み合わせが現実的に考えられるようスケジューリング対象を限定して選択することによって、制約にすべて合致する好ましい小日程計画を予め求めることであった。中日程計画で与えられるジョブ集合を割り付ける差し立て計画に代え、むしろ、中日程計画の方を調整する方法でもある。さらに、複雑な組み合わせパターンを効率良くするために、資源制約がある場合のディスパッチング優先順位を工夫することの重要性を明らかにした。

この方法で得られる小日程計画は、何回でも再利用できるため作業習熟効果を期待できる利点や、現場での作業選択と段取り作業に費やす時間を減少させる特長がある。この方法による計画は、現実に運用されるものとなり、実際に生産工数が減少する作業改善効果も得た。

これらの問題は、現実の複雑なシステムに基づいて考察され、解決されたものであり、一般的な結論を得るために生産システムをモデル化することの有効性を実証することができた。

5.2 今後の展望

本論で、生産システムのモデリングに用いた手法は、シミュレーション [35] を主とした。今後も受注生産をモデル化して行くために核となる方法であると確信している。

納期延期を伴う受注生産型事業に、pull 型生産管理を適用することを、本論の主題としてきたが、多品種生産については、生産チャンスが限定される簡単なバッチ生産を論じた。今後、多品種切り替え生産に拡張 [36] することや、需要がトレンドや周期変動を持つケース、多段工程生産などを考慮するために、生産能力の影響を検討することは、実用するための課題である。また、実務的には、見込み在庫を伴う pull 型生産を導入するリスクについて、在庫量の議論に基づく結果とは別の観点と結びつけて整理分類する研究も必要であろう。

小日程計画作成に用いたシミュレーションは、複雑な工程作業条件をモデル化するのに適している。しかし、工程シミュレーションにおいて小量受注生産を考えることは、非定常性が強くなり、結論の導出が困難になるので、研究としてあまり進んでいない。このような場合の解析法を体系化することが、シミュレーション技術に対して、今後望まれよう。

この研究が、一見とらえどころのない生産管理のシステム化と標準化に寄与することを強く願う次第である。

最後に私自身の研究方向について思うところを記して結びとしたい。管理技術の研究は、高度成長期に盛んであって、もはや古びている印象を持っていた。しかし、メーカーに勤務し、多く現場を見る機会に恵まれるにつれ、現実的な視点から出発しなければならないと強く自覚するに至り、生産管理研究として、この論文をまとめた。一方で、管理技術として双璧である品質管理も、相対的に高品質が達成されたと言われる現在にも、きわめて重要であることは間違いない。品質データの解析

にしても、新方法の開発はまだ必要であって、私は、統計的方法の応用によるデータ解析方法の研究〔37〕も行なってきた。ところで、現在までの研究動向は、これらは別々の分野となっていて、有機的に結び付いているとは言い難い。そのことに強い危惧間を持っている。たとえば、生産管理論で理想とされる生産計画と、品質解析のための実験計画やドキュメンテーションは、実践の場では同時に関連して考えられるべきものであろう。この両分野を研究してきた者として、生産管理と品質管理を融合させる総合的な管理技術に関する研究分野を構築することに挑んでみたいと思っている。

謝 辞

学位論文をまとめるにあたり、圓川隆夫教授には、懇切なご指導を頂きました。企業においてすでに生産管理の研究を行っていた私を受け入れてもらい、学位取得をなすためのギャップを埋めて頂きました。わが国において、大学人以外が学位を取ることは、まだまだ特異なことであり、学位に対しての考え方もいろいろでしたが、この論文を完結できたのは、なによりも先生のご尽力の賜でした。心より感謝申し上げたい。また、曹徳弼先生は、第3章のシミュレーションを分担くださいました。私の研究ペースの粗密が極端になってしまったため、お付き合い頂く時間について、お忙しい中ご迷惑をおかけしてしまったと思います。今後も、鋭意、共同研究を続けてゆくことで謝意を表したい。

私が生産管理研究に興味を持ったのは、旭硝子株式会社に入社し、多く実線に触れる機会を得たからである。このような機会と、それを学問的に研究する機会を与えてもらった上司の方々に御礼申し上げたい。この研究成果を、少しでも会社に還元することに努力したいと思う。

研究者としての私の原点は、品質管理を専攻した東京大学の学生時代にあることは間違いない。研究し論文を書くプロセスを教えて頂いた飯塚悦功教授、学問の世界をご教唆頂いた久米均同名誉教授にあらためて感謝したい。

最後に、サラリーマンの傍ら、長期休みには論文書きに終始した生活を我慢してくれた家族に感謝する。

1997年晩秋

金沢八景を眺める自宅にて起草し、瀬戸内海に望む高砂工場にて結ぶ。

和田 雅宏

参考文献

- [1] 大野耐一、トヨタ生産方式、ダイヤモンド社、1978
- [2] Conway.R.W., MaxwellW.L., Miller,L.W.、Theory of scheduling, Addison-wesley、1967
- [3] Baker,K.R.、Introduction to sequencing and scheduling, John Wiley & Sons, Inc.、1974
- [4] Black,J.T.、The design of the factory with a future, McGraw-Hill,Inc.、1991
- [5] Bennett,D.、Production systems design, Butterworth & Co Ltd.、1986
- [6] 圓川隆夫、“CIM そして IMS に向けて”、経営システム、Vol.2、No.1、pp.4-11、1992
- [7] 黒田充、“CIM から COM に向かって”、オペレーションズ・リサーチ、pp.241-249、1995 年 5 月
- [8] 和田雅宏、“生産管理とスケジューリングの関係 –具体例から–”、COM のための生産計画・スケジューリング研究部会第 8 回研究会、日本オペレーションズリサーチ学会・日本経営工学会、1995
- [9] 関根智明監訳、スケジューリングの理論、日刊工業新聞社、pp.2-4、1971：原本は文献 [3]
- [10] 黒田充、“生産スケジューリング研究の課題と展望”、生産スケジューリングシンポジウム'94、日本オペレーションズリサーチ学会、1994
- [11] 黒田充、“生産スケジューリングの方法”、経営システム、Vol.5、No.1、pp.5-14、1995
- [12] 文献 [9] の pp.9
- [13] 和田雅宏、“生産組み合わせ制約のある多品種変量受注生産方式の設計”、経営システム、Vol.3、No.4、pp.223-242、1994
- [14] 工程管理ハンドブック編集委員会、工程管理ハンドブック、日刊工業新聞社、1992

- [1 5] Hu,T.C., Combinatorial Algorithm, Chapter 6, Addison-Wiley, 1982
- [1 6] 和田雅宏・曹徳弼・圓川隆夫, “発注納期より確定納期が遅れる取引の push/pull 型生産在庫”, 日本経営工学会誌, 投稿中
- [1 7] Spearman,M.L. and Zazanis,M.A., “Push and pull production system: issues and comparison”, Oper. Res., pp.521-532, Vol.40, No.3, May-June, 1992
- [1 8] Sarker,B.R.,Fitzsimmons,J.A., “The performance of push and pull systems : a simulation and comparative study”, Int.J.Prod.Res., pp.1715-1731, Vol.27, No.10, 1989
- [1 9] Siha,S., “The pull production system: modeling and characteristics”, Int.J.Prod.Res., pp.933-949, Vol.32, No.4, 1994
- [2 0] Hodgson,T.J., Wang,D., “Optimal hybrid push/pull control strategies for a parallel multistage system : Part I”, Int.J.Prod.Res., pp.1279-1287, Vol.29, No.6, 1991
- [2 1] Hodgson,T.J., Wang,D., “Optimal hybrid push/pull control strategies for a parallel multistage system : Part II”, Int.J.Prod.Res., pp.1453-1460, Vol.29, No.7, 1991
- [2 2] 曹徳弼・圓川隆夫, “季節変動及び生産能力制限下のハイブリッド生産指示方式について”, 日本経営工学会平成 5 年度春季大会予稿集, pp.140-141, 1993
- [2 3] 平川保博・星野共二・片山博, “2 段階生産システムにおける押し引き混成型生産指示方式の特性解析”, 日本経営工学会誌, pp.78-83, Vol.43, No.2, 1992
- [2 4] 和田雅宏, “多工程少量生産のための再利用型日程計画”, 経営システム, Vol.5, No.1, pp.50-60, 1995
- [2 5] 村松林太郎, 新版生産管理の基礎, 国元書房, 第9章, 1979
- [2 6] Gupta,J.N.D., “Two-Stage,Hybrid Flowshop Scheduling Problem”, J.Opl.Res.Soc., pp.359-364, Vol.39, No.4, 1988

- [2 7] 董彦文・北岡正敏、“複数台機械を持つ2工程フローショップの総所要時間最小化スケジューリング問題に関する研究”、日本経営工学会誌、pp.363-370、Vol.43、No.5、1992
- [2 8] Narasimhan,S.L., Mangiameli,P.M.、“A Comparison of Sequencing Rules for a Two-Stage Hybrid Flow Shop”、Decision Sciences、pp.250-265、Vol.18、1987
- [2 9] 椎原正次・栗山仙之助・能勢豊一・大西学、“最大作業時間割当法によるスケジューリングに関する研究”、日本経営工学会誌、pp.236-241、Vol.44、No.3、1993
- [3 0] Wittrock, R.J.、“An Adaptable Scheduling Algorithm for Flexible Flow Lines”、Oper.Res.、pp.445-453、Vol.36、No.3、1988
- [3 1] 上野信行、“製造分野における離散系シミュレーション技術の展開”、オペレーションズ・リサーチ、pp.571-577、Vol.38、No.11、1993
- [3 2] 平林直樹・長沢啓行・西山徳幸、“ジョブショップ型FMSにおける工具配分法”、日本経営工学会誌、pp.56-62、Vol.45、No.1、1994
- [3 3] Conway,R., Maxwell,W., McClain,J.O., Thomas,L.J.、“The Role of Work-In-Process Inventory in Serial Production Lines”、Oper.Res.、pp.229-241、Vol.36、No.2、1988
- [3 4] So,K.C.、“The Impact of Buffering Strategies on the Performance of Production Line System”、Int.J.Prod.Res.、pp.2293-2307、Vol.28、No.12、1990
- [3 5] 藤井進、“生産システムにおけるシミュレーション”、経営システム、Vol.1、No.2、pp.118-124、1992
- [3 6] 曹徳弼・和田雅宏・圓川隆夫、“納期延期を伴う需要の生産方式の選択問題”、日本経営工学会誌、投稿中
- [3 7] 和田雅宏、“中途打ち切りデータによる回帰分析の新しい推定方法”、品質、Vol.19、No.2、pp.77-87、1989