

生産システムにおける様々な待ち

中出 康一

近年の需要の多様化により、迅速な対応を行いながら、かつ在庫低減などによりコストを抑える生産が求められている。本稿では、生産システムにおける様々な種類の待ちと、その重要性について議論するとともに、Fork/Join型待ち行列システムによる生産システムのモデル化について述べる。

キーワード：生産ライン、JIT、在庫、Fork/Join型待ち行列

1. はじめに

現在の需要の多様化や激しい変動、製品の短寿命化に伴い、生産リードタイムの低減、開発・設計期間の短縮が求められています。一方で、さらなる原価低減、在庫の削減が必要とされています。生産工程を観察してみると、これらの問題が各種の待ち時間と深く関係していることがわかります。生産における待ち時間というと、通常思いつくのは顧客が到着してから、製品が到着するまでの待ち時間でしょう。生産システムの設計では、この納期とともに、仕掛品や完成品がラインの中に滞留する時間をいかに短くするかが重要になります。本稿では、生産工程を中心に、待ち時間としてどのようなものがあるかを示し、それらと待ち行列モデルとの関係やどの待ち時間を短くすればよいかについて議論します。

2. 仕掛品の待ち時間

一般に、顧客、あるいは後工程によって発注されてから納品されるまでの時間を生産リードタイムといいます。この中には、

- ・ 加工時間、組み立て時間など、原料から付加価値を高めて、完成品とするための本当の意味で価値のある時間
- ・ 工程間物流、工場間物流など、物流のための時間

といった必要な時間以外に、次のような待ち時間があります。

- ・ 注文されたが、原料、部品が到着していないた

なかで こういち

名古屋工業大学 ながれ領域

〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町

めに待つ時間

- ・ 機械が別の部品を加工するために使われているため、その加工が終わるのを部品が待つ時間
- ・ 前の部品の加工が終わっても、次の部品が異なる種類の場合、その段取りにかかる時間
- ・ ある工程の加工終了後、次の工程への搬送を待つ時間
- ・ 次の工程に運ばれたが、前の部品（ロット）が加工されているために停滞することによる待ち時間
- ・ 完成品となっても、そこで注文が変更になったために在庫として引き取られるのを待つ時間

これらの待ち時間は、仕掛品が在庫として滞留することを意味するため、何の価値も生み出さない、いわゆるムダな時間となります。

現在の生産の考え方では、在庫が付加価値や利益の低下をもたらすことや、先に述べた製品寿命の短期化といった観点から、ムダな在庫をより少なくすることが必要とされています。その一方で、需要が急増したときに在庫が足りなくなり、顧客の信頼が低下するという問題は今も存在します。したがって、どの程度在庫を持つべきかということを、製品ごとに勘案して、管理することが重要となります。

この在庫について、「製品」あるいは「仕掛品」を「需要や後工程の引き取りを待つ客」としてとらえることにより、待ち行列理論と関連づけることができ、基本的な問題については在庫理論としてこれまで発展してきました[1, 2]。なお管理方法については、売り上げなどをもとに製品群をその重要性から三つに分類し、各群ごとに定期発注方式、発注点方式などを適用するABC分析がこれまで利用されてきました。しかし、多種多様な製品を迅速に生産する必要に迫られ

る状況では、そのような単純な分類だけではなく、製品ごとに、その特性を考慮してよりきめ細かく分類していくことが求められます。また在庫より品切れによる影響が大きく、在庫をある程度持つこともやむを得ない場合でも、意識改革や費用低減の手段として在庫削減を打ち出すことは意味があると考えられます。

3. 作業員・機械の待ち時間

生産工程をよく見ると、製品の待ちだけでなく、作業員の待ち時間が生じることがあります。例えば、自動車などの組み立てラインでは、作業員がライン上のある範囲内で担当する仕事を受け持ちます。ある作業員にとって、車種 A の仕事は負担が軽く、車種 B の仕事は大きいとしましょう。A, A, B とライン上を流れてきた場合、作業員は車種 A 2 台の仕事をすぐ終え、車種 B がまだ前の人の作業位置にあることが起きます。そのとき、その車が自分の作業域に来るまで待たなければなりません。すなわち、ライン上で車種 A が連続して来ると、その間常に作業員は次の車が来るのを待たなければならなくなります。一方、車種 B が連続してくると、長時間の仕事が続いてくるため、場合によっては作業員が自分の作業できる地域を超えてしまい、ラインを止めなければならなくなります(ラインストップ)。また作業員によっては、車種 A の作業負荷が高く、B の負荷が軽いこともあります。したがって、どのような車種の順に流せば、このようなラインストップや作業待ちを防ぎ、全体として効率的なライン運営ができるかを考える必要があります。なお、この製品投入順序づけ問題は、このような作業員の負荷バランス以外に、部品の消費スピードを一定に保つことを目的にすることが多くあります。同じ種類の製品を続けて生産すると、同じ部品ばかり使用するため、1 日何回かに分けて部品が納入されるにもかかわらず、一時的にある部品は足りず、ある部品は例えば 1 日分たまったままということになってしまいます。そうなると、前工程は欠品となるのを防ぐために、どうしても作る時に間に合うようにまとめて部品を送ろうとします。このとき、その部品は使用されるまでの間在庫となってしまいます。そのため、部品の消費速度にむらが出ないようにする必要があります。

作業員の待ち時間についてもう一つの例を挙げましょう。複数の工程を受け持つことのできる多能工をライン上に設け、需要に応じて作業員数を増減させるこ

とにより、作業待ちを減らし、効率的に運用できることが知られています[3]。通常、各作業の標準時間が設定され、その時間通り行えば作業員がある機械に戻って来たとき機械が加工をすでに終了し、作業員の加工完了を待つ時間が生じないようにラインの設計がなされています。しかし、実際には作業時間のばらつき、機械の一時的な故障の発生、部品の未到着などの理由で、作業員が加工完了を待つことがあります。これらの作業員の待ちは、需要に見合った数以上の作業員を抱えることにつながるため、ムダであると考えられます。

このような作業員の待ち時間以外に、部品を加工できるようにするまで「機械が待つ」時間があります。仕掛品が来ない、ある製品を作ろうとして部品が到着しない、工具や機械が故障したといったものです。もちろん、故障はできるだけ起きないように工夫する必要がありますし、需要があるのに意味もなく機械を待たせてはいけません。しかし、高い機械があるのに使用しないのはもったいないから、あるいはあとで需要が増えるかもしれないからと、需要がないときにまで無理にモノをつくらうとすると、在庫がたまり、結局ムダになってしまいます。したがって、この機械の待ちは必ずしもムダではありません。

4. Fork/Join システム

これまで示してきた待ち時間が発生する生産システムを待ち行列モデルとして表現するとどのようなのでしょうか。

図 1 のように、A, B と 2 種類の客が到着して、二つの客がそろうとまとめてサービスをするというモデルを考えましょう。例えば、A を需要、B を完成品とします。完成品が先に到着すれば、需要を待つ完成品在庫となり、需要が到着し引き取りの処理を終えるとともに二つの客が同時にシステムから去ることになります。また、需要が先に来れば、完成品が到着するのを「需要」が待つことになります。

このように、作業員、仕掛品のような具体的に見えるものだけでなく、需要、機械加工といった「もの」

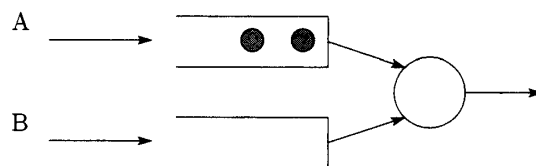


図 1 Join 型待ち行列

ではない対象も客として扱うことによって、待ち行列モデルとして視覚的にとらえることができます。ほかにも、Aを部品、Bを作業、サービスを作業とおけば、部品が到着し、かつ作業がこの工程に戻ってきたときに作業を行うことを図1は表します。また、サービスへの入力流が三つ以上ある場合も考えられます。このような複数の種類の客が揃ったときサービスを行うシステムはJoin型と呼ばれます。

また、サービスの後も2種類またはそれ以上に分かれることも考えられます。例えば、ある作業を終えたとき、作業者は別の機械に行くと同時に、完成品は次の機械の加工を受けるために進むといったものです。この場合、Fork型として表現することができます(図2)。

さらに、有限バッファ待ち行列を、無限バッファのみを持つFork/Join型待ち行列として表現することができます。二つの工程A、Bで続けて製品が加工を受け、その間に有限の仕掛品バッファがある生産ラインを考えます。工程Aで加工を受けた製品は、次の工程Bの前に待ち、その後、工程Bで加工を受けますが、もし工程Bの前の在庫置き場に空きがなければ、工程Aにとどまり、工程Aでは次の製品の作業を行えないとします。これをFork/Join型モデルで表現したのが図3です。サーバBで加工を受けると、仕掛品を表す客が発生して次の工程に進むと同時に、「空き」を表現する客がBから生じ、Aに向かうものとします。すなわち、サーバBから実際の製品と「空き」の2種類の客が生じます。サーバAでは、この「空き」を表す客がきているときには、AとB

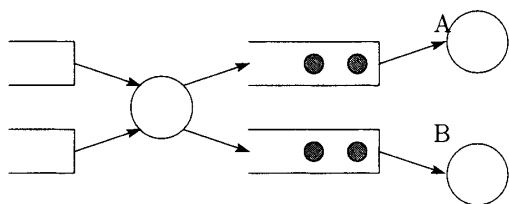


図2 Fork型待ち行列

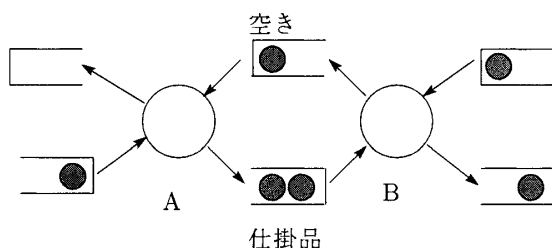


図3 有限バッファのFork/Join型表現

の間に実際にバッファの空きがあると考え、作業を行い、Bから「空き」の客が来ていないときには、前に置く場所がないため作業を行わないことを図3は表現しています。

このように、生産システムにおいて、特に人やものの動く道が決まっている場合には、Fork/Join型待ち行列システムで表現することが可能です。その上で、

- ・ 待ちをなくするために、どのように工夫すればよいか
- ・ 加工、作業、需要など、到着、サービス時間などにばらつきが生じて待ちが発生するには、どの待ちを許容し、どの待ちを許さないものとして重要視すればよいか
- ・ その解析にはどのような手法があるか

ということを考えていくことが重要です。最近では、先に述べたように

- ・ 在庫(仕掛品、完成品)は必要最小限にする
- ・ 作業者に作業待ちはできる限りさせない
- ・ 機械は加工を待たせたほうがよいこともあるとされています。

なお、このようなFork/Join型システムについて、そのモデルの確率的、また定性的な性質の解析が進んでいます[4, 5]。また、マルコフ性を仮定したモデルや、ある特定のモデルについて待ち時間の解析がなされています。一般の到着過程や、閉ネットワークにおける待ち時間の解析はまだそれほど多くありませんが、最近では文献[6]において単純なFork/Joinステーションにおけるスループットの2次モーメント近似がなされています。なお、ルートが一定ではないモデル、例えば作業者が周辺の状況を見て行き先を決めるようなモデルになると、マルコフ性などの仮定を行わない限り解析は難しくなります。

5. おわりに

現代の生産では、多品種生産に対応するため、工程における品種の切り替え時間や作業時間のばらつきを極力抑える必要があります。したがって、在庫理論的な考えをする以前に、IE的な手法で切り替え時間や平均作業時間、あるいは作業時間の分散を減らすことがより本質的であると今でも現場では考えられています。すなわち、待ち行列モデルにおける仮定そのものを変えていくことを最重要視します。その一方で、改善を行いながら、例えばライン全体を待ち行列モデルととらえ、どこに待ちが多く発生するかを見極めるこ

とで、ボトルネックとなるところに資源を集中させることが必要と考えられます。

ところで、需要が激しく変化をするといっても、1年計画、1ヶ月計画、週の計画という計画は、部品の調達、人員の確保などの面から必要でなくなるわけではありません。したがって、このような計画を立てながら、需要の情報に対応して部品工場を含め生産が柔軟に変化することが重要です。このためには、従来の在庫理論などの枠にとらわれない、全体最適化を目的とした生産システムの数理モデル化が重要になってきていると考えられます。

一方で、部品工場は配送先の異なる部品の製造を受け持つことが多いため、一つの部品のために最適化して製造することは困難です。例えば2種類の部品の需要増大に同時に対応することは製造能力から考えると困難なことがあります。したがって、各工程が、上流、下流工程と情報を互いに伝達、共有しつつ、自律的な生産を行う必要があります。

このような多様で複雑な条件を考慮しなければならない状況では、確率過程、待ち行列やあるいはその制御理論をそのまま生産現場に適用しても、待ち時間の「値」を理論的に求めて解析するのは困難なことが多く、その場合シミュレーションなどに頼らざるを得ません。しかし、システムの本質をとらえたシンプルなモデルを構築することにより、作業・加工時間とスループットの関係、最適（あるいは最適に近い）発注・在庫政策、情報の共有が待ち時間などにもたらす影響を理論的に解析することは可能ではないかと考えられます。

最後に、最近の成果が集められている文献として文献[7~9]を挙げておきます。この中には、先に示した文献[6]のほかに、生産システムの確率的性質や、需

要情報を考慮した生産システムの確率モデルを扱った論文があります。

参考文献

- [1] J. A. Buzacott and J. G. Shanthikumar: Stochastic Models of Manufacturing Systems, Prentice-Hall, NJ, 1993.
- [2] P. Zipkin: Foundations of Inventory Management, McGrawHill, Boston, 2000.
- [3] 中出康一: U字生産ラインの性能評価, オペレーションズ・リサーチ, vol. 47, no. 4, pp. 231-236, 2002.
- [4] F. Baccelli and A. M. Makowski: "Queueing Models for Systems with Synchronization Constraints", Proceeding of the IEEE, vol. 77, pp. 138-161, 1989.
- [5] K. Nakade and K. Ohno: "Stochastic Properties of Fork/Join Multi-Stage Production Systems with General Blocking", Journal of the Operations Research Society of Japan, vol. 40, no. 3, pp. 341-355, 1997.
- [6] A. Krishnamurthy, R. Suri, and M. Vernon: "Two-Moment approximation for Throughput and Mean Queue Length of a Fork/Join Station with General Inputs from Finite Population", Chapter 5 of [8], pp. 88-126, 2003.
- [7] Supply Chain Structures: Coordination, Information and Optimization, J-S Song and D. D. Yao (eds.), Kluwer, Boston, 2002.
- [8] Stochastic Modeling and Optimization of Manufacturing Systems and Supply Chains, J. G. Shanthikumar, D. D. Yao and W. H. M. Zijm (eds.), Kluwer, Boston, 2003.
- [9] Analysis and Modeling of Manufacturing Systems, S. B. Gershwin, Y. Dallery, C. T. Papadopoulos and J. M. Smith (eds.), Kluwer, Boston, 2003.