

# 物と情報の流れの待ち行列網モデル

米田 清

## 1. はじめに

CIM (Computer Integrated Manufacturing) がめざすのは、需要を入力として製品を出力する生産過程を、コンピュータで統合することである[1]。図1のように入力である需要は情報で、出力である製品は物なので、そこには生産系と情報系の双方がサブシステムとして含まれる。生産系には物の流れ、搬送、保管、加工などいろいろな生産設備や、それらを操作する人間が含まれる。情報系にはデータやジョブといった情報の流れ、生産管理や品質管理のためのデータベース、コンピュータ群、通信網、それらを操作する人間が含まれる。CIMの生産系と情報系はいわば生体の循環器系と脳神経系にあたる。

生産系と情報系では技術内容が異なるので、普通、工場内の組織としても別々な部門に分ける。両者を分離するのが自然だとするもう1つの根拠は、時間尺度のオーダーが異なることである。たとえば物の流れを日単位で捉えるなら、工場内の定型的な情報の遅延は、せいぜい時間単位までしかない。情報系で生産系を管理できるのは、各々の速さが1桁程度は違うからだ。と従来は考えられていた。ところが、物と情報が混在するカンバン方式の成功によって、生産系と情報系を分離して考える必然性は疑わしくなった[2]。

CIMを成功させるには、生産系と情報系とは文化が違うので話しが通じにくいといった事態をなくし、多くの人々がシステム全体を見渡せる視点に立てるようにすることが前提になる。そのためには、生産系と情報系に共通の言語が要る。しかもその言語が実際に使われるためには、単に相互理解に役立つという迂遠な議論のみでなく、日常の仕事に役立つ実利が欲し

い。また、物の流れと情報の流れが一体化したシステムを考えるには、両者を含んだ単一のモデルで表現したい。

そのような表現法として待ち行列網を活用しよう、というのが本稿の趣旨である。系内を流れるのが物が情報か、それらを扱うのが生産設備か情報処理装置か、時間単位は分か秒かなどを捨象して、システム性能の観点で眺めると、生産系も情報系も待ち行列網としての構造に帰着できる。以下、待ち行列網を用いてシステムを表現する方法について概観する。ついで、問題の設定が原因から結果を求めるという自然な方向にしたがっていない、逆問題の対処法に触れる。

## 2. 表現の枠組みとしての待ち行列網

待ち行列網が性能問題に関して、生産系と情報系の両方を表現できることを説明する。

待ち行列とは図2のようなものである。ジョブと呼ばれるものが、サービス・ステーションと呼ばれるものに到着する。サービス・ステーションはバッファと呼ばれるものと、プロセッサと呼ばれる装置からできている。ジョブはバッファに入って順番を待ち、プロセッサによって

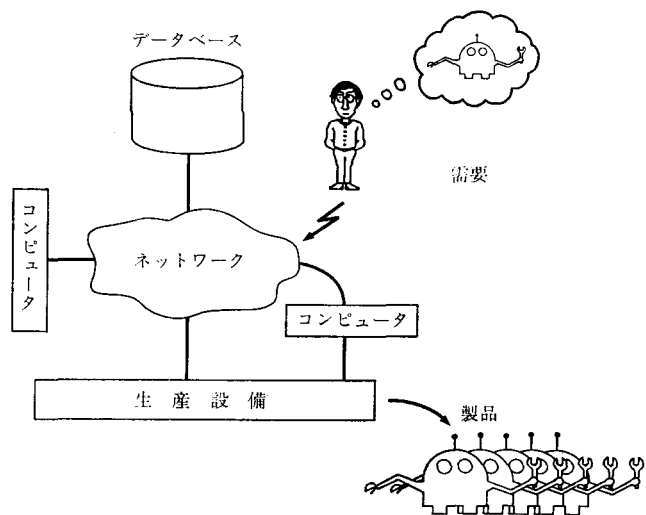


図1 情報系と生産系

よねだ きよし (株)東芝 システム・ソフトウェア技術研究所

〒210 川崎市幸区柳町70

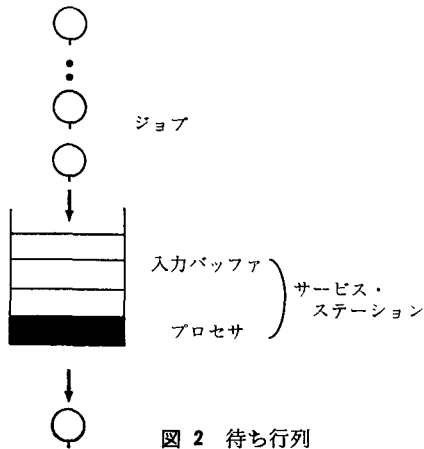


図 2 待ち行列

処理される。処理されたジョブはサービス・ステーションの外へ去る。

このような状況は一般性があり、郵便局やカフェテリアなど日常的な場面でも見られるし、港湾における船の荷役順番待ち、工場における設備待ちなどにも見られる。一般に限られた資源の需要者が多数存在するという状況は、待ち行列として表現すると便利である。ジョブが需要者ないし負荷を表わし、サービス・ステーションが供給者ないし資源を表わす。

待ち行列網モデルは、待ち行列を複数個連結したモデルである。たとえば図 3 で

ジョブ = 検索および登録の要求

ステーション：(0) 端末群 (それを操作する人間系も含む) (1) CPU (2) ディスク

とすれば、これは図 4 のデータベースを待ち行列網で簡

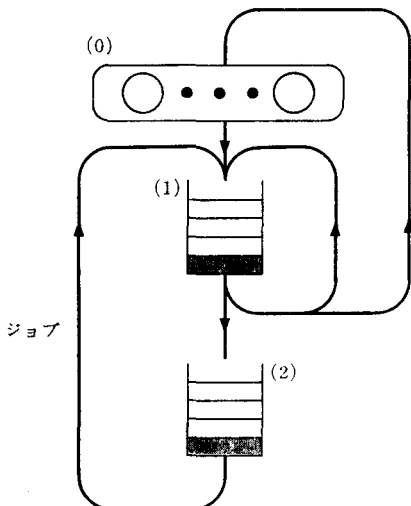


図 3 待ち行列網の例

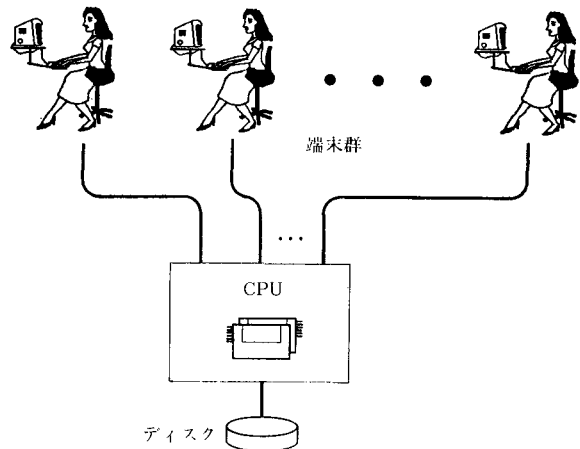


図 4 データベースの例

単にモデル化したものである。CPUとディスクが、それぞれ待ち行列によって表わされている。端末群も一種の待ち行列で、ジョブの数だけプロセサがある。すなわち、ジョブの数は端末の数だけである。

矢印はジョブの流れを表わす。端末群を出た検索要求は、いったんCPUに受け付けられる。CPUはディスク検索を何度か行ない、その結果が端末に返される。ジョブは端末で人間が画面を見て考えるなどして処理した後、ふたたび新しい検索要求として出てゆく。以上の仕事の流れを、ジョブが待ち行列から待ち行列へ移動するものとして表現する。

ジョブが時間を費すのは、待ち行列として表現されている、ディスク、CPU、端末群のいずれかである。矢印で表わされている移動は、時間がかからないものと考えられる。もしも移動には無視できない程度の時間がかかるなら、その移動時間を表わすステーションを付け加えればよい。

待ち行列自体が抽象的な概念なので、待ち行列網も1つのモデルでいろいろな状況を記述できる。たとえば図 3 で

ジョブ = パレット

ステーション：(0) 倉庫 (1) 検査装置 (2) 加工装置と書き換えてみると、同じ待ち行列網がそのまま図 5 の工場を表わしている。すなわち、工場全体では一定個数のパレットがある。パレットは倉庫で原料を乗せて、加工装置へ運ばれる。中間製品を乗せたパレットは検査装置と加工装置の間を何度か往復し、最終製品を乗せて倉庫に返される。倉庫に帰ったパレットは、製品を降ろした後、ふたたび新しい原料を乗せて倉庫を出てゆく。

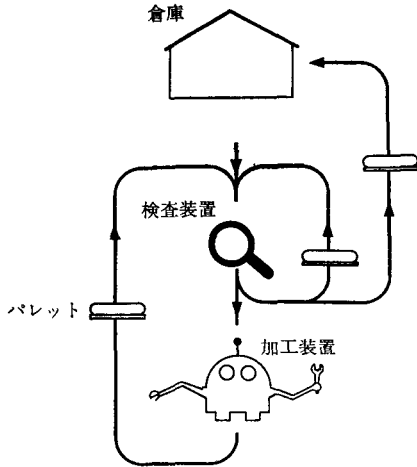


図 5 工場の例

さらに図3で  
 ジョブ=生産装置  
 ステーション：(0) 装置監視盤 (1) 調整機 (2) 生産現場

と書き換えてみると、同じ待ち行列網が、図6の工場を生産装置のオペラビリティの観点から表わす。工場全体では一定個数の生産装置がある。生産装置は通常生産現場で稼働している。それが故障すると装置監視盤は遠隔操作でリセットを試みる。成功すれば装置は生産に復帰し、失敗すれば調整機の世話になる。調整機と監視盤を何度か使うと、最終的に生産装置の故障は直り、現場に返される。この例では監視装置は情報のみを扱い、調整機は物を扱っている。すなわち、このモデルには物と情報の流れが混在している。

以上の小さな例からでも、表面的には無関係に見えるいろいろなシステムが、形式的には全く同じ待ち行列網で表現できることがわかる。このように、待ち行列網という枠組みを用意しておけば、生産系も情報系も、両者の混在も表現できる。待ち行列網で考えることに慣れていけば、対象が生産系でも情報系でも、理解しやすい。

なお、待ち行列網は図3のような閉じたものとは限らず、図7のように開いた、ジョブが系外から到着する形もある。ジョブ種類によって開閉とり混ぜた、混合待ち行列網もある。実用規模のモデルでは、ジョブの種類やステーションの数がいずれも数十以上になることは珍しくない。

### 3. 待ち行列網から何がわかるか

では待ち行列網を共通言語として採用すると、話しが

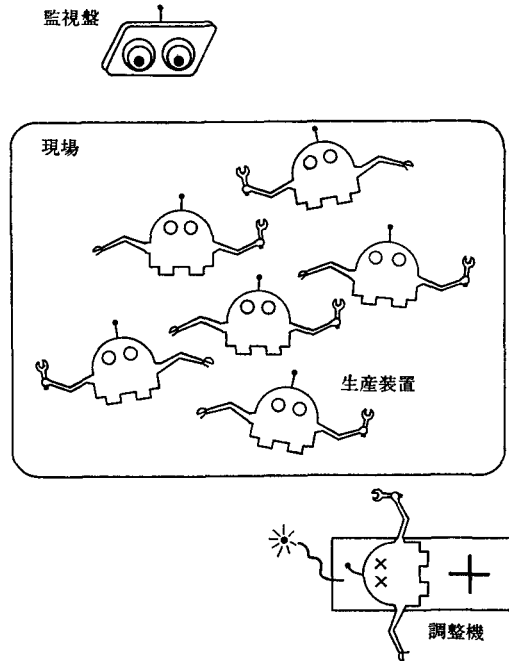


図 6 故障修理の例

通じることの他に、どんな実利があるか。システムを待ち行列網として表現し、基礎データを与えると、それをもとに性能指標が求められる。つまり、システムに関する断片的な知識をつなぎ合わせて、総合的な性質を予想する役にたつ。このように、データからさまざまな性能指標を求めることを、待ち行列網モデルを解くと言う。

ジョブの種類を「何が」、ステーションを「どこに」とすると、待ち行列網を解いて次の数値が得られる。

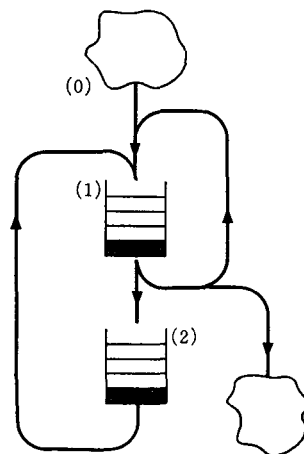


図 7 開待ち行列網

滞留数：何が どこに いくつ 溜っているか

滞在時間：何が どこに 何単位時間 とどまっているか

スループット：どこで 何を 単位時間あたりいくつ処理しているか

利用率：どこが 何を 処理するのに 何割 時間を使っているか

最も基本的なのは滞留数である。どこがネックで混んでいるか、これで大体わかる。滞在時間は、システムのユーザとしては最も関心のある指標である。スループットは、1日に製品をいくつ加工しているか、といったことで、設備の管理者が気にする指標である。利用率ないし稼働率は、与えられた負荷に対してシステムのどこが弱くてどこが過剰かを表わす。スループットも利用率も統計概念なので、長い間の平均はこうなる、という言い方になる。

これらの基本的な数値を組み合わせると、より複雑な性能指標が得られる。たとえばデータベースの例なら、ジョブの動く経路にしたがって滞在時間を足せば、端末から見た応答時間がわかる。また、先の信頼性の例で、滞留数の分布から、現場に稼働している装置が一定数以下になる確率が出る。

#### 4. 待ち行列網の入力

待ち行列網が解けるためには、どのような情報が必要かである。入力とは基本的に次の各項目である：

- ジョブの記述
- 各ステーションがジョブをどう処理するかの記述
- ジョブが複数のステーションをどう使用するかの記述

ジョブの記述は、次の点である。まず、区別して記述したいジョブの種類がいくつあるか。たとえば、製品をジョブと考えるなら、品種はどれだけあるか。次に、図3のような閉じた待ち行列網の場合ならば、各種類について、ジョブがシステム内にいくつ同時に存在するかを表わす、系内個数。たとえば、工場内の総中間在庫量である。図7のように開いた待ち行列網の場合は系内個数の代りに、ジョブが系外からどう到着するかの記述を与える。たとえば、原料の平均投入時間間隔や、その変動係数。また、到着のしかたが待ち行列網のどこにどのようなジョブがどれだけ溜っているかに依存することもある。たとえば、工程が混雑していると受け入れが閉められる。

ステーションの記述は、待ち行列規律とサービスの速

さからなる。待ち行列規律は、個々のステーションがそこに到着するジョブをどのような順番で処理していくかを表わす。たとえば先着順とか、ジョブに優先度があって割り込みが生じるなどである。また、サービスの速さについては、平均サービス時間、その変動係数などでサービス過程を規定する。これは、そのステーションにどれだけジョブが溜っているかに依存することもある。たとえば、プロセッサが複数あると並列処理ができるので、ジョブを1つ処理するのにかかる平均時間は、混んでいた方が短くなる。より複雑に、待ち行列網のどこにどのようなジョブがどれだけ溜っているかに依存してサービス時間が決まることもある。たとえばオペレータが複数の装置を受け持つと、ある装置が混んだときオペレータの時間がとられて、他の装置の能率も落ちる。

ジョブがステーションをどう使用するかの記述は、ジョブがステーションからステーションへ渡り歩く経路を表わす。たとえば、投入された原料がどこどこの装置で一連の加工を経て製品となるか。2つの異なる中間製品がどこで組み立てられて1つになるか。このルートも待ち行列網のどこに何がどれだけ溜っているかに依存することがある。たとえば、主機が混んでいると、予備機へまわる。

待ち行列網の入力は大略上のとおりで、記述の詳細さと欲しい情報によって、より簡単になったり、より複雑になったりする。たとえば待ち行列網の過渡的な状態を時間に沿って追跡したいなら初期状態が必要である。また解き方によっては経路情報は必要なく、ジョブが各ステーションを訪問する回数情報だけあればよい。

#### 5. 待ち行列網の解き方

表現するだけなら、待ち行列網で相当複雑なシステムが描ける。では、そうして表現した待ち行列網を解く手段にはどんなものがあるか。待ち行列網を解くとは、図8のような変換を行なうことであった。待ち行列網に何を与えて何が得られるかは、因果関係のとおりであると考える。つまり、原因に関するパラメータを与えて、結果である性能指標を得る。因果関係は、互いに関連する変数のうち、時間的に先に決まっている方が原因で、後に決まるのが結果であるとみなす。

解き方は、シミュレーションと待ち行列網解析（数値計算）に大別できる。それぞれ一長一短がある。これらについてのあらましは、文献[3-5]を参照されたい。解き方自体に興味があるのではなく、応用に関心がある

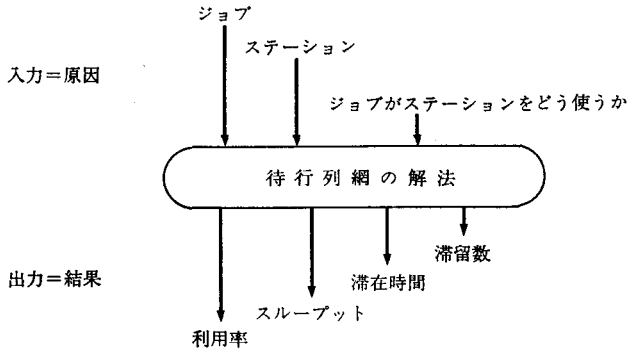


図 8 待ち行列網の入出力

場合は、なるべくサポートの受けやすい既成のパッケージ・ソフトウェアを使うべきである。

待ち行列網モデルは解けるように立てなければ実利がない。必要な情報が得られる範囲内でぎりぎりまで単純化した。解きやすくして誤りの起きにくいモデル作りを心がけるべきである。

## 6. 待ち行列網の逆問題

現場で起こる問題は、待ち行列網の型にはまっているとは限らない。たとえば各品種の月産目標と設備使用量を与えて、それなら各設備が何台必要か、といった問題もある。あるいは、各品種に目標工期があるとき、どの品種を月産何台にしたら間に合うか、という問題もある。つまり、通常は待ち行列網の定式化で入力として与えられる資源能力を、出力として要求するのである。このように入力と出力が逆転した定式化を逆問題と呼ぶ。何を与えて何を求めるかによって、いろいろな種類の逆問題がある。

上の例にあげた設備計画問題は、通常はたとえば次のようにして解く。まず、品種ごとの月産目標と、生産設備への投資総額を決める。次に、投資総額以内でそろえられて、かつ生産目標を達成できそうな設備計画を経験にもとづいて立てる。以上の結果として得られた生産システムを待ち行列網に定式化し、品種ごとの生産量はどうかを計算する。もしも生産目標が達せられるならよし、だめなら計画をやり直す。

これは計画を手で立てるので、労力がかかる。しかも、試行錯誤の結果得られた最終設備計画が良いものなのか悪いものなのか、評価する手段がない。これを何とかしたいという要求がある。現在、以下のような方針の実用性を検討しており、ある程度の結果を得ている[6]。

一般に逆問題は、最適化問題に焼き直せる。たとえば設備計画の例なら、投資予算内で立て得る設備計画の全体を考え、その領域の上で生産目標の未達成分を最小化する。この評価関数のうち、生産目標の達成成分を計算するのに待ち行列網が使われる。こうすれば、形式的には最適化の枠組みに乗る。

逆問題には入出力で何を既知とし何を未知とするかによっていろいろな変形があり得る。たとえば設備の台数や能力は所与で、加工順序に自由度があることもある。そのため、上と類似の方法で得られた最適化問題が、一

般にどのような性質を持つかは予見し難い。たとえば領域が連続であったり離散であったり、極値が複数あるかもしれない。そこで、どんな大域最適化問題でも、そこそこに解けるプログラムを用意しておきたい。

そのためには、シミュレーテッド・アニーリング[7]やジェネティック・アルゴリズム[8]のような、確率的な最適化手法が有力である。これらの方法は、一言でいえば試行錯誤を効率化したものである。効率化の工夫は、自然界でうまくいっている試行錯誤のまねから始まる。生物の進化における自然淘汰のまねをするのがジェネティックで、規則的な結晶が分子のものでたらしめな運動から形成される現象をまねるのがアニーリングである。

このように確率的最適化法を利用して逆問題を1つ解くためには、順方向の問題を極めて多数、たとえば数千個解かねばならない。これを実用的な計算時間に収めるためには、順問題を1題当たり1秒以下で解く必要があり、シミュレーションでは無理である。それができるのは、待ち行列網の数値解法の中でも特に高速なものだけである。

## 7. おわりに

CIMの性能問題を表現し解析する道具として待ち行列網が使えることを説明した。解法にはシミュレーションと待ち行列網解析がある。後者は高速なので、確率的な最適化法と組み合わせると、待ち行列網の逆問題が実用的に解ける場合がある。

待ち行列網の実用上の問題点としては、モデルのパラメータを集める作業が人手で行なうには量が多すぎることがあげられる。そこで、CIMのデータベースと、待ち行列網の計算に使うコンピュータを接続し、直接パラメータを採れるようなインフラストラクチャが必要である。

それを整備してはじめて、待ち行列網が現場で日常的にCIMの道具として使える。

## 文 献

- [1] システム制御情報学会：システム／制御／情報。CIMインフラテクノロジー&事例特集号：34, 3 (1990)。
- [2] 沖野教郎：生物型生産システム。システム総合研究131 (1990)。
- [3] 木村俊一：QNA：Queueing Network Analyzer について (1-3)。オペレーションズ・リサーチ, Vol.29, Nos.6-8 (1984), pp.366-371, 431-439, 494-500。

- [4] 米田, 黒田：待ち行列網解析 [I, II]；IEレビュー, Vol.30, No.2-3 (1989)。
- [5] 米田：離散系シミュレーションとその他のシステム評価技法の使いわけ：計測と制御 Vol.30, No.2 (1991)。
- [6] 長幅, 和田, 米田：待ち行列網の逆問題による設備計画, OR学会1990年秋期研究発表会 2-C-7。
- [7] Otten, R. H. J. M. and van Ginneken, L. P. P. : The Annealing Algorithm. Kluwer (1989)。
- [8] Goddberg, D. E. : Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning; Addison-Wesley (1989)。

## 会 合 記 録

1月9日(水)	庶務幹事会	8名
1月11日(金)	表彰委員会	9名
1月14日(月)	企業サロン企画委員会	5名
1月17日(木)	研究普及委員会	10名
1月21日(月)	広告委員会	5名
1月22日(火)	編集委員会	8名
1月22日(火)	理事会*	15名
1月28日(月)	FME S委員会	5名

## \*第5回理事会議題

1. 平成2年度第4回理事会議事録の件
2. 入退会の件
3. 第3・四半期収支報告の件
4. 研究部会の新設ならびに継続の件
5. 本部定例講演会終了および収支報告の件
6. RAMPシンポジウム(関西)およびマーコビッツ講演会終了
7. 平成3年度事業計画・予算案の件
8. その他

## 「論文・事例研究」の原稿募集!

ORの特徴は実践にあるといわれています。実践的な応用をぬきにした理論ということはORでは考えられません。本誌でも以前から会員の皆様からの事例研究の報告をお願いしてきましたが、まだ十分な成果をあげているとはいえません。

「論文・事例研究」は企業、研究所、大学等で実際に行なった事例を論文としてまとめたものを広く会員の皆様に紹介することを目的として作られた欄です。この論文は2人のレフリーによって正式に審査されますが、マネジメント、行政、工学等の広い分野において適用対象の新しさ、適用方法の新しさ、適用範囲の広さ等が論理的、科学的に論じられたものでありますならば、積極的に採用する方針です。皆様のご投稿をお願い申し上げます。

投稿要領：学会原稿用紙36枚(26字×12行)以内(図・表を含む)  
(ワープロ可)投稿先はOR学会事務局OR誌編集委員会宛。

なお、原稿の他コピーを2部添付してください。

レフリー審査の結果、改訂をお願いしたり、採択されない場合があることをご了解ください。また、原稿は、採択・不採択にかかわらず、原本、コピーともお返しできません。(OR誌編集委員会)