

称号及び氏名	博士（工学） 中瀬 逸平
学位授与の日付	平成 20 年 3 月 31 日
論文名	「待ち行列理論に基づく生産システムの特性解析と最適設計」
論文審査委員	主査 長澤 啓行
	副査 川本 俊治
	副査 小亀 英己
	副査 有菌 育生

## 論文要旨

近年、生産システム設計のためのモデルに関しては、顧客の多様なニーズへの対応、在庫費の削減、およびインターネット取引の発達などの要因を背景に、受注生産システムモデルが適用される状況が増えつつある。受注生産システムの特徴としては、顧客の注文を受けてから製品の生産を開始するため、製品の在庫削減や投下した資金の回収の早期化、さらに、顧客の製品に対する多様な要求に合致した製品をより提供しやすくなるなどの利点がある。他方、受注してから納入するまでの期間が長くなるという問題があるため、詳細な生産管理や納期管理が必要となる。さらに、製品仕様の変更に対応するための部材の調達方法や需要変動に対応するための生産設備の維持・管理・運用方法などの検討も必要となる。ここに、注文を客とみなし、受注を客の到着、生産活動を客へのサービスとして捉えることにより、受注生産システム全体を待ち行列システムとして捉えることができる。このような着想のもとで、従来より受注生産システムの定常状態解析に関して待ち行列理論の応用が種々なされてきた。

このような受注生産システムの解析に限らず、生産設備などの構成要素の故障というイベントを客とみなし、その発生を客の到着、修理を客へのサービスとして捉えることにより、生産システムの故障・修復プロセスを待ち行列システムとして捉えることができる。さらに、待ち行列理論に基づく解析を通して、一般的なシステムの状態に関する理論解析およびその結果に基づく信頼性解析や最適化問題の考察が可能になる。

また、受注生産システムを受注窓口、生産工程および部品倉庫等の構成要素に細分化することもできる。これら細分化された構成要素のそれぞれに対して注文や生産指示があり、部品や中間製品等の複雑な流れがあり、処理や加工を待つジョブが発生する。このような受注生産システム内部の各構成

要素もまた待ち行列システムとしてモデル化することができる。

さらに、近年の省資源化や環境問題への配慮から使用済み製品の回収・再利用によるリサイクル、リユースを考慮したリマニュファクチャリング生産システムの構築への流れが強まっている。このようなシステムは、個々の受注生産システムを構成要素とする **Open Queueing Network**（開放型待ち行列ネットワーク）としてモデル化することができる。ここで **Open Queueing Network**（開放型待ち行列ネットワーク）と対をなす用語として **Closed Queueing Network**（閉鎖型待ち行列ネットワーク）が存在する。ここに、システムを構成する複数のステーションが存在し、もの・情報などの客がシステム内だけで複数のステーション間を確率的に移動・循環するシステム・モデルを閉鎖型待ち行列ネットワークと呼ぶのに対して、システムの外部から客が入り、システム内の複数のステーション間を移動・循環し、システム外に出て行くシステムを開放型待ち行列ネットワークと呼ぶ。

待ち行列システムの解析においては、客の到着時間間隔の分布や客へのサービス時間の分布は、解析の容易さのため指数分布に従うと仮定されることが多い。しかし、信頼性解析や開放型待ち行列ネットワークモデルの特性解析においては、指数分布ではなく、平均と変動係数のみが既知である一般分布が想定される場合があり、この場合の解析手法の開発が期待されている。

以上のような状況を勘案して、本論文では生産システムの最適設計および最適運用を目的として、待ち行列理論に基づく各種生産システムの定常状態解析と最適設計の問題について考察した。本論文は7つの章により構成されており、各章における成果の概要は以下のように要約される。

第1章「緒論」では、待ち行列理論に基づく生産システムの特性解析と最適設計に関する従来の研究を概括したうえで、本研究の目的と本論文の構成について述べた。

第2章「臨時設備による能力増強を考慮した受注生産システムの最適稼働方策」では、顧客からの注文によって生じた受注残数に応じて、臨時生産設備の稼働(開)および停止(閉)をコントロールしてシステムを運用するというモデルを想定し、システムの受注残に関する状態推移を待ち行列モデルにより記述し、システムの定常状態確率の解析を行った。その際、グラフ解法に基づき定常状態確率を定式化した。さらに、評価関数として常設設備の稼働費用および臨時設備における稼働費用、臨時設備の開閉費用、機会損失および調達部品の在庫費用からなる総コスト関数を定義し、この評価関数のもとで総コストを最小化する臨時設備の最適稼働開始方策の決定および各コスト係数の最適稼働開始時期への影響を明らかにした。

第3章「緊急修理工を擁する  $k$ -out-of- $n$  : G repairable system の解析」では、生産システムを構成するユニットの故障に対して、システム内に常駐して日常的に対応する常設修理工と故障ユニット数の増大に応じて配置される緊急修理工を想定し、 $k$ -out-of- $n$  : G repairable system による解析を行った。具体的には、それぞれ異なる修復能力を有する常設および緊急修理工をもつシステムを対象に、緊急修理工の投入と引揚に関する保全方策について考究した。このような故障と修復を繰り返すシステムの信頼性評価尺度である平均アベイラビリティを評価するために、システムの状態推移を待ち行列モデルにより記述し、その定常状態確率を導出した。さらに、求められる定常状態確率およびシステム・アベイラビリティに基づき、いくつかのコスト要素を勘案することで緊急修理工の投入ー引揚に関する経済的方策について言及した。

第4章「磨耗故障と偶発故障の故障モードをもつシステムのアベイラビリティ解析と最適保全方策」では、偶発故障と磨耗故障の2つの故障モードをもつシステムを対象に、平均アベイラビリティを評

価するための近似解析法を提案した。その際、故障要因は多様であり故障時間が指数分布に従わない場合も多いこと、複数の故障要因が存在し、各要因による故障が異なった分布に従う状況も存在することなどを考慮して、故障時間が指数分布に従う偶発故障に加えて、摩耗故障による故障時間分布も考慮することにした。この摩耗故障による故障時間の分布については、その平均や標準偏差のみが情報として利用できる状況を想定し、システムの状態推移を待ち行列モデルにより記述した。このモデルを用いて、システムの定常状態確率を解析し、平均アベイラビリティを評価した。得られたシステムの平均アベイラビリティに基づき、システム内での故障や修復の種類、故障に至るまでの時間などを勘案した最適保全政策について検討した。さらに、偶発故障を意味する指数分布だけでなく、平均と標準偏差がわかる任意の分布に対して提案手法を用いることにより、複数の任意の故障モードをもつ、より一般的なシステムの平均アベイラビリティも解析的に導出した。

第5章「開放型待ち行列ネットワーク理論によるリバース・ロジスティクスをもつ受注生産システムの最適生産方策」では、開放型待ち行列ネットワーク理論に基づき、省資源化および環境保護のもとで使用済み製品を回収し、再生資源として利用するリバース・ロジスティクスを伴う受注生産システムの最適生産方策について考察した。今日のリサイクル、リユースによるリマニュファクチャリングのもとでは、完成製品としては同一品種でも新規の部品調達による新規製品とリユース部品を用いた再生製品が混在することになる。そこで、リユース部品に関しては使用済み回収製品を一旦在庫として保管し、必要に応じて処理し、リユース部品を再利用する状況を想定した。このように、新規製品と再生製品が混在する受注生産システムを開放型待ち行列ネットワークによりモデル化した。さらに開放型待ち行列ネットワーク理論に基づき、受注から納品までに発生する製品の加工費用、製品の納期遅れに伴う損失、および回収製品の在庫費用について解析し、使用済み回収製品を利用する再生製品に対する最適生産指示割合を決定するための方策を導出した。

第6章「GI/G/1 待ち行列システムの解析の一考察」では、GI/G/1 待ち行列システムの定常状態確率および平均システム内人数の解析法を提案した。第5章で取り扱った開放型待ち行列ネットワークにおける各構成要素は基本的にGI/G/1 待ち行列システムとしてモデル化される。このGI/G/1 待ち行列システムの平均システム内人数または定常状態確率に関しては、それぞれ個別にいくつかの近似解析法が考案されている。しかし、平均システム内人数と定常状態確率を与えるそれぞれの近似解析法は統一的な解法概念に基づいて与えられてきたわけではない。これら状況に鑑み、GI/G/1 待ち行列システムの到着間隔時間の分布およびサービス時間の分布をそれぞれ2つのアーラン分布による混合アーラン分布で近似し、これらの組合せによる4つのErl/Erl/1 待ち行列モデルの混合システムとしてGI/G/1 待ち行列システムを近似的にモデル化した。この近似法に基づき、各Erl/Erl/1 待ち行列モデルの平均システム内人数および定常状態確率の解析結果を利用して、GI/G/1 待ち行列システムの平均システム内人数と定常状態確率を与える統一的な解法概念に基づく近似解析法を提案した。さらに、提案解析法の平均システム内人数および定常状態確率の近似精度が十分高いことを数値例で検証した。

最後に、第7章では、結論として各章の内容を要約し、本論文を総括した。

## 審査結果の要旨

本論文では、生産システムを待ち行列理論に基づいてモデル化し、システムの定常状態確率を解析し、コスト最小化のためのシステムの最適設計・運用方策を提案したものであり、次の成果を得ている。

- (1) 常設設備に加え、受注残に応じて稼働する臨時設備をもつ生産システムにおいて、臨時設備の稼働開始時期をパラメータとしてシステムの定常状態確率を導出している。これを用いて、受注残の管理費用、臨時設備の稼働費用および開閉費用からなる総コストを最小化するための臨時設備の最適稼働開始時期決定法を提案している。
- (2) 生産システム構成ユニットの故障に対して、常設修理工に加え、故障ユニット数に応じて投入される緊急修理工を想定し、正常稼働ユニット数に関する定常状態確率をグラフ解法により求め、平均アベイラビリティを評価している。これに基づき、システム運用コスト最小化のための緊急修理工の投入-引揚方策を提案している。
- (3) 磨耗故障に関する故障時間分布について平均と標準偏差だけが既知である状況下で、偶発故障と磨耗故障の2つの故障モードをもつシステムの定常状態確率を解析し、修理費用とシステムダウン損失の和を最小化するための最適保全方策を提案している。また、複数の任意の故障モードをもつ、より一般的なシステムの平均アベイラビリティも導出している。
- (4) 使用済み製品を再生資源として利用する受注生産システムを対象に、加工費用、納期遅れペナルティおよび回収製品の在庫費用からなる総期待コストを解析し、使用済み回収製品を利用する再生製品に対する総期待コスト最小化の最適生産指示割合の決定法を提案している。
- (5) GI/G/1 待ち行列システムを対象に、到着間隔時間とサービス時間の分布を混合アーラン分布で近似し、Kawamura の解析法を適用することにより、平均システム内人数と定常状態確率を与える近似解析法を提案している。従来は定常状態確率とは関係なく平均システム内人数のみを導出する、あるいは平均システム内人数を所与として定常状態確率を解析するものであったが、提案法では両者に関する統一的な解析法を与えている。

以上の研究成果は、電気情報システム工学分野において、システムの最適設計・運用法に関する意思決定手法の発展に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うに必要な能力と学識を有することを証したものである。本委員会は、本論文の審査ならびに最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。