

報告番号	甲 第 11081 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 バッチプロセスにおける異常の診断とその回避
(Diagnosis and Avoidance Control of Faults for Batch Processes)

氏 名 橋爪 悟

論 文 内 容 の 要 旨

近年、消費者嗜好の多様化および製品ライフサイクルの短縮化が進んでいる。これにより、化学産業においては従来主流であった連続プロセスによる汎用品の少品種大量生産に代わり、バッチプロセスによる高機能品の多品種少量生産への要求が高まっている。また、Industrie4.0 や Society5.0 が提唱する消費者と生産プロセスを直接繋げるオーダーメイドシステムの登場により、この傾向は続くことが予想され、バッチプロセスは今後益々重要になると考えられる。

バッチプロセスの特徴として、主に非定常運転である同一の装置で複数の処理を実行する複数のバッチを同一の設備内で同時に生産する等が挙げられ、連続プロセスと比較して複雑な生産形態である。そのため、バッチプロセスにおける計画・設計・運用手法に係る研究やその現実プロセスへの適用例は、連続プロセスと比べ、格段に少ないのが現状である。よって、これらの問題の意思決定は、未だに多くの部分で経験者の知識やノウハウ等に頼らざるをえない。これは、安全性が高く、高い製品品質を維持した運転を実現するために必要不可欠な“異常対応”においても同様である。

本研究では異常対応を、プラント内で発生した異常を検出し、検出された異常の原因を特定することを目的とする”異常の診断”と検出・特定された異常の再発を確実に回避する制御器の設計を目的とする”異常の回避”から構成されているとした。異常対応に係る既往の研究においては、本来密接に関連している異常の診断と異常の回避が別々のモ

デルを用いて個別に解かれておりそれらを統一的に扱う枠組みが確立されていない、バッチプロセスで頻出する組成や粘度等の観測できない状態（不可観測な状態）や物質が自発的に作用し外部から抑制ができない動作（不可制御な動作）を同時に取り扱う異常の回避の手法が存在しない、そして生産計画の変更、プロセスのもつ非線形性や動作状態間の因果関係の変化等の不確実性を伴うプロセスにおける異常の回避の手法が存在しないという問題があった。そこで本研究では、既往の研究におけるこれらの問題を解決し、バッチプロセスにおける異常の診断とその回避のための合理的な方法論を確立することを目的に、次の3つの検討を行った。

- [1] 異常の診断とその回避を統一的に扱う方法論の確立。
- [2] 不可観測な状態、不可制御な動作の要素を含むプロセスを対象に、異常の回避の方法論の確立。
- [3] 不確実性の要素を含むプロセスを対象に、将来の予測に基づき異常を回避する方法論の確立。

本研究ではこれらの問題を解決する手段として、プロセスシステム工学的な視点から、バッチプロセスの動作を動的システムモデルにて表し、そのモデルのもとで各問題の解決を図ることとした。また、バッチプロセスの動作を時々刻々と連続的に遷移するシステムの状態変化を概括的にとらえることで、事象が非同期的、離散的に生起することによって、状態が不連続に遷移する離散事象システムとしてとらえることとし、これを異常対応の各問題で共通して用いることのできる異常対応モデルとした。

以下に各章で得られた主な研究成果を要約する。

第2章では具体的な検討の準備として、従来その概念が曖昧であった異常を一般化された形で定義し、動的モデルの上での異常の表現方法を明らかにした。ここでは、化学プロセスにおける異常を、プロセスが正常に動作する限り、決して現れることがない状態である“異常状態”とプロセスの状態を正常状態から異常状態に遷移させる動作である“異常動作”と定義した。そして、化学プロセスで発生する異常を、1つのプロセス変数がそれ単独で示す異常と個々のプロセス変数は正常であっても、それらを組として見たとき現れる異常に分類した。後者のタイプの異常に関しては、これまでに十分な検討がなされておらず、その検出方法も確立されていなかった。本研究ではこの種の異常をとらえるため、プロセスが正常な動作をする限り複数のプロセス変数が満たすべき条件である“動作制約”を定義し、動作制約の成否に基づき、異常の検出を行うことを提案した。また、これらの異常に係る問題を取り扱うための離散事象システムモデルとして、バッチプロセスの動作の特徴である、逐次的動作、並行的動作、非決定的動作を陽に記述でき、システムモデル固有の解析手法を備え、階層性に優れたペトリネットに着目し、これを本研究で用いる異常対応モデルとした。そして、異常状態を表すマーキングや異常動作を表すトランジション

ンを用いることで、現実のプロセスにおける異常がペトリネットモデル上で表現可能であることを明らかにした。

また、動的モデルの上で異常対応に係る問題を解くことを考えた場合、それを矛盾なく行うためには、将来起こりうる異常をすべて予測し、それをモデルに組み込むことが必要となる。しかし、すべての異常を予測することは非常に困難であり、現実的には不可能と考えられる。そこで、本研究では、未経験の異常が発生するたびに、その異常を表す状態や動作を既存のモデルに組み込むことで、徐々に扱うことのできる異常を増やす現実的なモデルの構築手順を提案した。

[1]については、第3章から第5章で検討を行った。ここでは、異常の検出、検出された異常の原因の特定、特定された異常の再発を回避する制御器の設計に関し、それぞれ異常対応モデルに基づく手法の検討を行った。

第3章では、異常の診断に係る検討を行った。本研究では動作制約の成否により、異常の検出を行うことを考えた。動作制約はプロセスの規模や複雑さが増すと、それを導出することが困難となる。そこで、本研究ではバッチプロセスの正常な動作を表すペトリネットモデルから、プレースインバリエント解析を用いて動作制約を導出する方法を開発した。また、動作制約に基づき検出された異常が異常対応モデルの上で組み込まれている経験済みの異常であれば、それを表す異常動作を異常発生の原因として特定する方法を開発した。そして、先に述べたモデル更新手法と組み合わせることで、異常診断と異常対応モデルの構築を同時に行う枠組みを示した。

第4章および第5章では、異常の回避に係る検討を行った。原因の特定された異常は、それを回避する制御器が設計可能であれば、その再発を回避できる。異常の回避の方法として状態と動作に着目し、動作制約を順守することを目的とした制御器を設計する“異常状態回避問題”と異常動作を含まない望みの動作を行うことを目的とした制御器を設計する“異常動作回避問題”の2つの制御器設計問題を定式化した。

第4章では、異常状態回避問題を取り扱い、動作制約の不成立を回避することを目的に、プロセスの状態に係る新たな不等式制約を設定し、これに基づく制御器の設計手法を示した。第5章では、異常動作回避問題を取り扱い、バッチプロセスの動作をペトリネットのサブクラスである条件/事象ネット(C/E ネット)で表し、半言語で記述されたトランジションの発火形態としての動作仕様が与えられた際、バッチプロセスの動作が動作仕様のみとなるような制御器を設計することを目的とするC/E ネット制御問題を定式化し、その解法を示した。しかし、この問題は制御器が常に求まるとは限らないため、この場合に対応できるよう制御器内の動作を加えた拡張C/E ネット制御問題を新たに定式化し、その解法を開発した。なお、これらの問題の解は必ずしも一意に定まらない。そこで、複数ある制御器の候補の中から構成が最も簡易な制御器を得るための問題を定式化し、これをC/E ネット合成問題の一つの問題であるC/E ネット最小実現問題に帰着させ、その解法を開発した。

[2]については、第6章で検討を行った。ここでは、現実のバッチプロセスに頻出する、観測が不可能なプロセスの状態や制御が不可能な動作を含む“不可観測な状態や不可制御な動作を含むバッチプロセス”に対する異常の回避に係る検討を行い、状態と動作それぞれに着目した制御器設計手法の検討を行った。異常状態の回避においては、不可観測な状態が取りうる値を推定し、動作制約の不可観測な状態に係る要素を削除することで、観測可能な状態のみから構成される新たな動作制約（不等号動作制約）を導出し、バッチプロセスの状態が常に不等号動作制約を遵守することを目的とする制御器の設計手法を開発した。また、不可制御な動作が含まれる場合においても、この手法を拡張することで制御器が設計可能であることを示した。一方、異常動作の回避においては、第5章で定式化したバッチプロセスの動作が動作仕様のみとなるような制御器を設計する問題を拡張し、不可制御な動作を含まない要素から制御器を設計する手法を開発した。

[3]については、第7章で検討を行った。本研究では、不確実性を含むバッチプロセスに対し、不確実性の影響を予測しながら異常状態に陥ることを回避するための方法として、ダイナミックベイジアンネットワークを用いた手法の適用可能性について検討した。そして、異常状態を回避する確率が最も高くなるような操作量をネットワークから求める方法を開発した。この方法を不確実性を伴う生産プロセスに適用し、数値シミュレーションの結果、将来予測をしない場合と比較して異常を回避できる確率が上がることを示した。

第8章は本論文の結論であり、本論文で得られた主要な結果を総括し、今後の展望を述べた。

以上、本研究においては既往の研究の問題の解決を図ることを目的とした[1]から[3]の検討を通じ、バッチプロセスにおける異常対応の合理的な方法論を確立した。[1]においては、バッチプロセスの動作を離散事象システムとしてとらえ、それをペトリネットで記述したモデルを異常対応モデルとし、このモデルのもと異常対応の各問題の解法を開発することで、これを達成した。[2]においては、モデルに不可観測なブレースおよび不可制御なトランジションの要素を新たに導入し、それらの要素を考慮した制御器設計手法を確立することで、これを達成した。[3]においては、プロセスのもつ不確実性の影響を確率過程を使って表現し、プロセスの将来動作が表現できる動的な確率モデルであるダイナミックベイジアンネットワークを用いた将来予測に基づく異常回避方法を開発することで、これを達成した。

本研究成果により、対象とするプロセスの規模や複雑さが増した場合においても異常対応の合理的な解決が可能となった。また、観測できない状態および制御できない動作を含むプロセスや不確実性を含むプロセスに対しても異常の回避を実現する制御器の設計が可能となり、既往の異常の回避の研究と比較し、より多くの種類の異常を扱えるようになった。この結果、バッチプロセスの安全性および製品品質の維持をより高いレベルで実現する運転が可能となることが期待される。