

# 離散型生産システムのための挙動表現モデルと検証システムの開発

## - 研究支援における研究内容と進捗状況 -

宮崎大学 工学部教育研究支援技術センター  
高塚 佳代子

### はじめに

近年の離散型生産システムを効率的に運用するためには、適切な運用戦略や制御システムを与えることが特に重要である。しかし、リアクティブかつ並列に非決定的な動作をするこの種のシステムの複雑な挙動を適切に表現できるようなモデル自体、まだ確立されていない。以上の点を踏まえ、本研究では、このような対象の挙動モデルを構築し、モデルに基づく制御系設計手法を提案するとともに、設計されたシステムが正しく動作するかどうかを検証するための手法を確立することを目的とする。

キーワード： 離散型生産システム 挙動表現モデル モデルに基づく設計 性質検証

### 1. 背景と目的

ネットワーク型生産システム、組み立て式プラント、バッチ型プラントといった様々なシステムがあり、これらは離散型生産システムと呼ばれている。そして、これらは、リアクティブ性、並行性、非決定性、操作上の自由度の多さといった問題を共通に持っている。このようなシステムを効率的に運用するためには、適切な運用戦略や制御システムを与えることが特に重要である。しかし、この種のシステムの複雑な挙動を適切に表現できるようなモデル自体、まだ確立されていない。

以上の点を踏まえ、本研究では、以下の(1)~(4)を目的とした研究を進めている。

- (1)離散型生産システムの挙動モデルを開発すること。
- (2)生産システム固有の特徴を踏まえたモデル化手法を確立すること。
- (3)開発した挙動モデルを使用した「モデルに基づく制御系設計手法」を提案すること。
- (4)設計されたシステムが正しく動作するかどうかを検証するための検証手法を確立すること。

本稿では、これらの目的に対する研究の内容と進捗状況について説明する。

### 2. 挙動モデルの開発

#### 2.1 開発の基本方針

まず挙動モデルの開発について説明する。複雑な動作を示す離散型生産システムの挙動モデルに求められる要件は、次の通り。

- ①人が見て理解し易い階層的認識が表現可能
- ②時間制約を伴う事象駆動動作が表現可能
- ③「リアクティブ・システム」としての表現が可能

④並列動作主体間での通信・同期・排他制御が表現可能

⑤次々として入ってくる処理対象の動作が表現可能  
本研究では、まず、これらの要件を最も良く満たす既存のモデルとして時間状態チャートを採用した。これは、システムの持つ階層的な並列動作構造をAND/OR ツリーの形でうまく表現でき、状態遷移の条件で実時間制約を扱え、ブロードキャスト通信の概念を持つようなモデルである。更にそこへ、通信・同期を表現する(要件④)ために必要な出力イベントの発火時刻の記述方法と、次々として入ってくる処理対象の動作を表現する(要件⑤)ために必要な「トークン識別子」を導入し、「拡張時間状態チャート」を開発した。

#### 2.2 拡張内容

開発した挙動モデル「拡張時間状態チャート」のベースとなる時間状態チャートについて説明した後、拡張部分について説明する。<sup>1)</sup>

##### 時間状態チャート

「状態チャート」とは、オートマトンを階層性や並行性を表現できるように拡張したものであり、「時間状態チャート」とは、状態遷移の条件で実時間制約を扱えるよう、通常の状態チャートを拡張したものである。

##### 拡張1 (出力イベントとイベントプールの導入)

まず、通信・同期を表現可能にするために、出力イベントに関する2つの記述方法を導入した。即ち、一つは、出力イベントの発火可能期間を指定できるような記述方法を導入し、もう一つは、出力された複数のイベントの扱いがAND型なのかXOR型なのかを指定

できるような記述方法を導入した。なお、出力イベントを指定された時間帯で発火させるための仕組みとして、出力イベントの全てを一旦格納する「イベントプール」と、それらの一括管理を行う「イベントプール・マネージャ」を導入した。なおイベントプールの内容の提示はブロードキャスト方式を採用している。

[例 1] (拡張時間ステートチャート)

図 1 は拡張時間ステートチャートの例である。この図は、システム全体の動作が、基本的には2つの動作PとQの並列動作で成り立ち、そのそれぞれが、状態AからBへの遷移と、CからDへの遷移で成り立っている様子を表している。また、イベントの発火時刻や動作モードは次のように指定されている。

- $a(10, \infty)$  AND  $a(20, \infty)$   
状態遷移 B→A が生じたときイベント  $a(10, \infty)$  かつ  $a(20, \infty)$  を生成し、 $a(10, \infty)$  は 10 クロック以降、 $a(20, \infty)$  は 20 クロック以降に発火させよ。
- $c(10, \infty)$  XOR  $c(30, \infty)$   
状態遷移 D→C が生じたとき、イベント  $c(10, \infty)$  または  $c(30, \infty)$  を生成し、 $c(10, \infty)$  ならば 10 クロック以降、 $c(30, \infty)$  ならば 30 クロック以降に発火させよ。

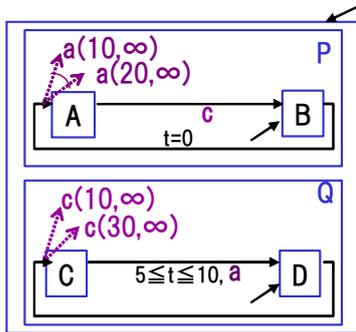


図 1 出力イベントの記述の例

拡張2 (複数トークンの扱い)

もう一つの拡張では、元々単一の処理対象を扱うモデルである時間ステートチャートを、「複数の処理対象が次々に入ってくる」といった生産システム特有の動作をモデル化できるようにするための拡張を行った。まず、挙動モデルの階層性・並行性を展開して得られる従来型の動作モデル(図 2-(1))では、各ノードにトークンがあるかないかの区別しかなかったが、次々に入ってくるトークンを識別させるための「トークン識別子」を導入し(図 2-(1)), 更に、トークンの発生や消滅タイミングを認識できるような仕組みを導入した結果(図 2-(2)), 個々の処理対象が処理されていく過程を個別に辿れるような望む動作モデルが得られた(図 2-(2)).

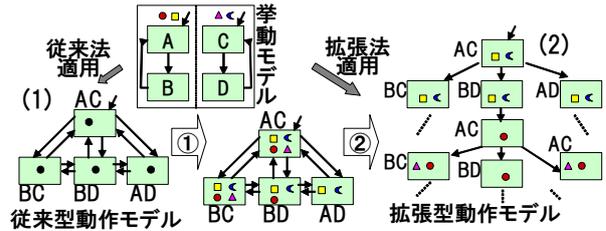


図 2 動作モデルの拡張

2.3 開発の成果

ここで、開発した挙動モデルを使うと離散型生産システムの複雑な動作がどのように記述されるかを示す。図 3-(1),(2)は、ネットワーク型生産プラントの一種である「特殊プラスチックフィルム製造プラント」の動作の概観と拠点間のインタラクションを示したものである。本対象は、図 3-(2)で示すように、あちこちの拠点同士での情報のやり取りが錯綜するといった特徴を持つのだが、開発した挙動モデルを使うと、図 3-(3)のようなすっきりした形で記述できる。ここでの注目すべき点は 2 つある。一つは、拡張時間ステートチャートの並行性・階層性、及び、導入された出力イベントの記述方法を用いると、図 3-(2)で示すような複雑なインタラクションが、図 3-(3)で示すように簡潔に記述されるということである。もう一つは、要求のバッファリング幅や再計画の上限設定といった様々なタイプの運用戦略の埋め込みや変更が容易に行えるということである。

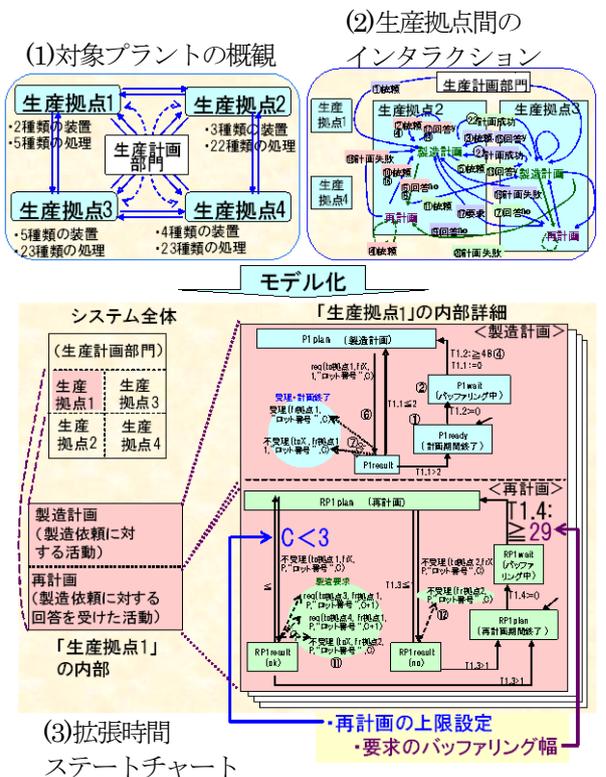


図 3 拡張時間ステートチャートによる動作記述

### 3. 生産システム固有の特徴を踏まえたモデル化手法の確立

以上述べたような挙動モデルの開発については、基本的にはほぼ完成されており、今後はこれを活用した研究が中心になると考えている。

上述したような拡張時間ステートチャートには、実は、その表現力の柔軟性ゆえ、出来あがったモデルに個人差が生じやすいという問題がある。その問題に対応するために、拡張時間ステートチャートの持つ自由度を一部制限し、その代わりに系統的に生成させる手法を現在開発している。具体的なアイデアは、生産システムが本来持っている「プロセスネットワーク型の構造」を生かすということである。<sup>2)</sup>

#### 3.1 プロセスネットワーク型モデルの導入

開発したモデル化手法の手順は、次の通り。

1. 先ず、頻繁な同期制御を必要とする処理同士は一つのノードにまとめる(図 4(1))。こうすることにより、頻繁な同期制御が必要な処理は、同じ動作マネージャによって管理されるようになる。

2. 更に、それ以外に同期を必要とする処理同士に対してはアークを導入する(図 4(2))。

以上の手順でモデルは得られる。

ところで、実際、この手のシステムで一番問題になるのは、どこでどういった制御をしないといけないかを見つけることである。このようなモデルを作っておくと、それを見つけ易いという大きな利点がある。例えば、図中では、点 P で示すようなアークの先端が集中するといった構造的特徴を持つ部分として制御部位が顕在化している。

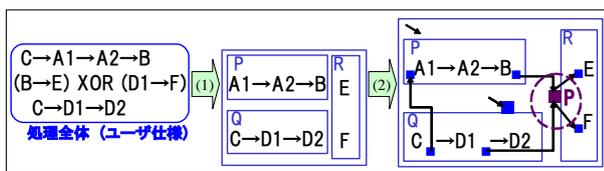


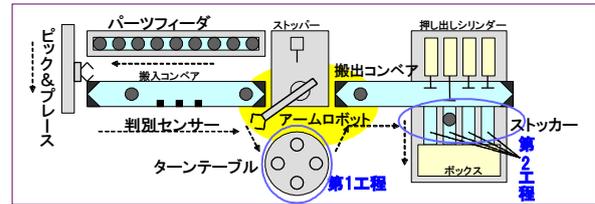
図4 プロセスネットワーク型モデル作成手順

#### 3.2 プロセスネットワーク型モデルの例

図 5(1)で示すような 2 工程のフローショップ型生産システムである FA 実験装置を例として、プロセスネットワーク型モデルの例を示す。本例題の特徴の一つは、アームロボットが、搬入コンベア端から 4 つの処理装置を持つターンテーブルへ、または、ターンテーブルから搬出コンベア端へ、処理対象の搬送が可能なので、5 箇所からの使用要求が競合する制御部位を持っているという点である。先に述べたように、このような制御部位は、作成されたプロセスネットワーク上では(図

5(2))、図中 P で示すようなアークの先端が集中するといった構造的特徴を持つ部分として顕在化する。

#### (1)フローショップ型生産システム <FA 実験装置>



#### (2)プロセスネットワーク型モデル

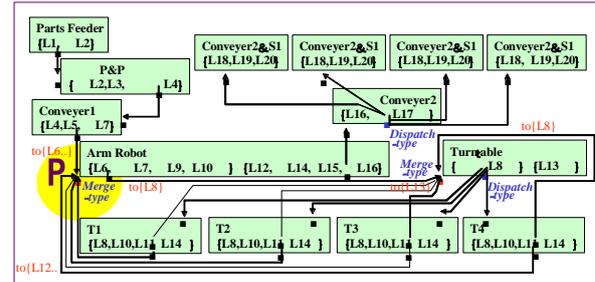


図5 プロセスネットワーク型モデルによる記述例

### 4. 離散型生産システムの制御系設計への適用

#### 4.1 拡張時間ステートチャートとプロセスネットワーク型モデルの活用

上で開発した 2 つの挙動モデルが、「制御系のモデルに基づく系統的設計」に活用できるということが分かり、現在その設計手法の開発を行っている(図6 参照)。具体的に、この手法でやりたいことは、ユーザが与えるプラント仕様、制御仕様をコントローラへ形式的・システムティックに橋渡しする事だが、着目して欲しい点は、そこでは、今まで開発してきたモデル(プロセスネットワーク、拡張時間ステートチャート)が重要な要素技術になっているということにある。現在は、制御に関する要求仕様が埋め込まれた挙動モデルからその制御動作を実機上で実現するのに必要な様々な情報を、いくつかの「テンプレート」を用いて系統的に抽出させる方法について研究を進めている。<sup>3)</sup>

#### 4.2 制御系設計手法の流れ

開発した制御系の設計手法でやっていることを FA 実験装置の例で説明する。まず、対象プラントの動作仕様(図 7(D1))から得られるモデルの雛形に対し制御を被せるとプロセスネットワーク型モデルが完成し(図 7(D2))、それを拡張時間ステートチャートへ変換することにより、制御が埋め込まれた挙動モデルが得られる(図 7(D3))。次に、その拡張時間ステートチャートから、各種テンプレートを用いることにより、制御に

関する仕様を実機上で実現するために必要な様々な情報がシステムティックな手順で抽出できる(図 7-(D4)). こうしてできるものを制御モジュールと呼び、これがコントローラへの入力データとなり、コントローラのドライバを駆動することになる。

## 5. 動作検証手法の開発

設計された挙動モデルがきちんと動作するのかわかをシステムティックな手順で検証するための手法について説明する。<sup>4)</sup>

### 5.1 検証の必要性

離散型生産システムにおいて「何のための検証が必要なのか?」という、「スケジュールリングや制御則によってユーザが恣意的に決定している部分」に対する検証が必要である。例えば、図 8 で示すようなバッチ型プラントに対し、「重合缶反応は長くとも 80 分で打ち切る」という制御則を導入した場合、安全面を考慮した「全ての処理対象に関し、重合缶 A1 での処理開始後 150 クロック以内に重合缶 A2 での処理が終了するか?」のような内容が「検証したいこと」として考えられる。

### 5.2 検証手法開発の経緯

本研究では、上述するようなシステムのための検証の枠組みを次のようにして開発した。まず、「複数のプロセスが並行動作し、かつ、タイミング制約が厳しい」といった生産システムと実時間並行ソフトウェアの特性の類似性に着目した結果、実時間並行ソフトウェアの既存の検証手法を採用した。そして、それを離散型生産システムのために拡張した。具体的には、既存の手法が持つ挙動モデル「時間状態チャート」、それが示し得る可能世界である「時間 Kripke 構造」、及び、それ(可能世界)の生成手法をそれぞれ拡張することにより、離散型生産システムの検証手法を開発した。

### 5.3 検証手法の基本構造

図 9 は、上述の拡張の結果得られた本検証手法の基本構造を示している。具体的には、拡張時間状態チャートで記述した対象世界の挙動を、これが引き起こし得る可能世界である拡張時間 Kripke 構造に展開し、論理式「TCIL」で書かれた調べたい性質に関する検証を可能世界上で全数探索的に行わせるという流れである。実際、この枠組み自体はプログラム検証では一般的な構造であるが、それに対して先に述べたような拡張をすることにより、本手法が得られた。

## 6. 提案手法の妥当性・有効性の実証的検証

以上説明してきた一連の提案手法の妥当性と有効性を検証するために、バッチ型化学プラント、FA 実験装置、ネットワーク型生産システムなどを対象に検証のための実験を一部始めている。その結果、上で述べたような限定された範囲において、図 10 で示すような結果が確認されている。具体的には、挙動表現モデルに関しては、ここで示す全ての具体例に対して、それが有効であることが確認されている。また、性質検証手法に関しては、部分的に、その有効性が確認されている。一方、プロセスネットワークによるモデル化手法、及び、モデルに基づく制御系設計手法に関しては、今後、これとは違ったアプローチも含めて検討が必要であると考えられる。

## 7. まとめ

- ・挙動モデルの開発： 離散型生産システムのための挙動モデル「拡張時間状態チャート」を開発した。
- ・モデル化手法の開発： プロセスネットワーク型モデルを用いて拡張時間状態チャートを合理的に限定しつつ系統的に生成する手法を考案した。
- ・制御系設計手法の開発： 開発した 2 つの挙動モデルを重要な要素技術として活用した制御系設計手法の枠組みを開発した。
- ・動作検証手法の開発： 設計された挙動モデルがきちんと動作するのかわかをシステムティックな手順で検証するための手法を開発した。

## 参考文献

- 1) 高塚 富田, 時間状態チャートの拡張と「イベントプール」を用いた Kripke 構造生成法の開発, 計測自動制御学会システム・情報部門第 42 回離散事象システム研究会講演論文集, 2007, pp39-44
- 2) Takatsuka Hirano Tomita, On a Formal Method for Modeling Discrete Production Systems based on Process-Network Architecture --With application to modeling of FA experiment device--, AdCONIP' 02, pp281-286
- 3) Takatsuka Tomita, On Model-based Approach for Developing Control Systems of Event-Driven Manufacturing Systems, INDIN06, p699-706
- 4) Takatsuka Tomita, On Modeling and Algorithm for verifying behavior of Discrete Parallel Production Systems, PSE Asia 2002, pp277-282

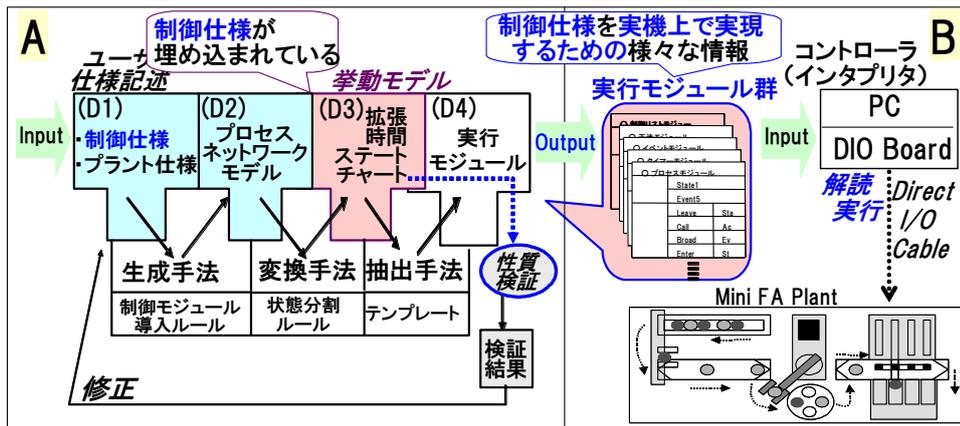


図6 挙動表現モデルを活用した制御系設計手法の枠組み

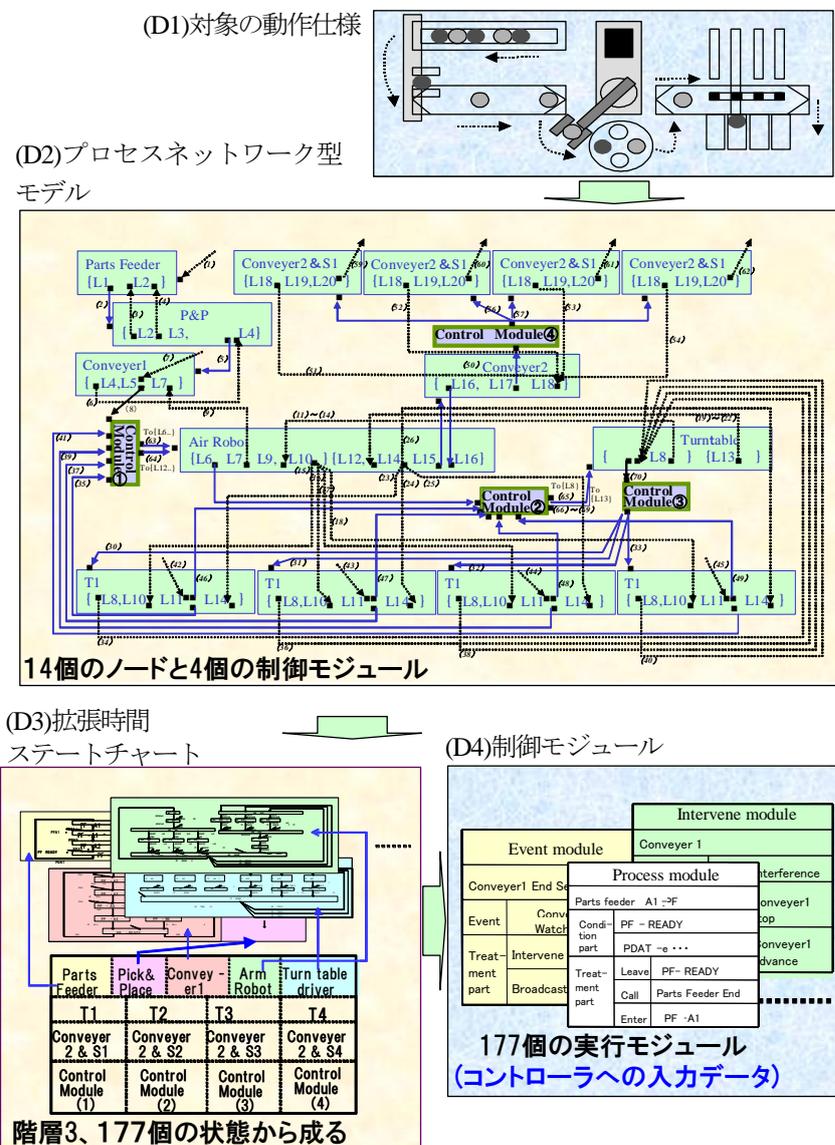


図7 制御系設計手法の流れ

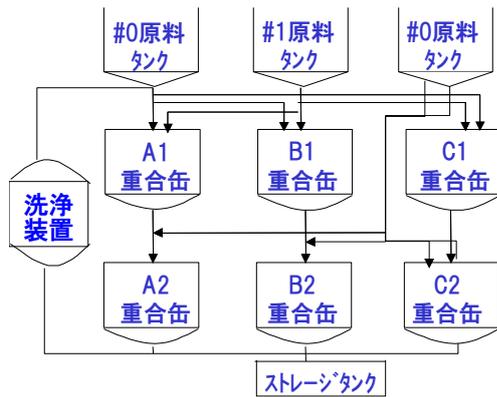


図8 バッチ型化学プラント

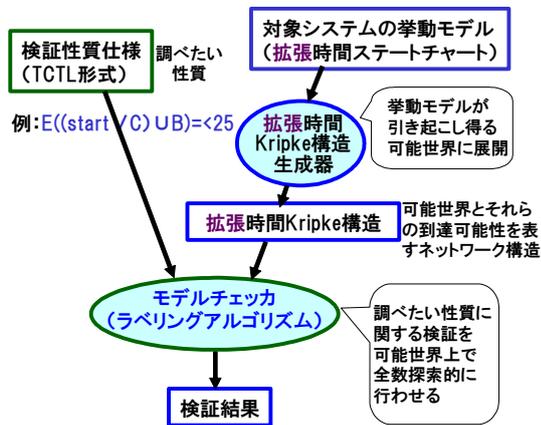


図9 検証手法の基本構造

実験結果		確認済み: 済 有効: ○ 別なアプローチの検討を要する: 要検討		
検証対象	バッチ型化学プラント	FA実験装置	一部確認済み: (済) 一部有効: ●	
研究テーマ				
挙動表現モデル	済 ○	済 ○	済 ○	済 ○
性質検証手法	(済) ●	(済) ●	(済) ●	(済) ●
プロセスネットワークによるモデル化手法	済 要検討	済 ○	要検討	
モデルに基づく制御系設計手法	要検討	(済) ●	要検討	

図10 提案手法の有効性を検証するための実験の結果