連続鋼板処理プロセスのハイブリッドペトリネットによるモデル化と モデル予測制御

小 中 英 嗣*・鈴木 達 也**
浅 野 一 哉***・飯 島 慶 次***

Model Predictive Control of Steel Sheet Processing Lines using Hybrid Petri Net Model

Eiji KONAKA*, Tatsuya SUZUKI**,
Kazuya ASANO*** and Yoshitsugu IJIMA***

This paper presents a new modeling and control techniques for the steel sheet processing line based on a Hybrid Petri Nets (HPN) and Mixed Logical Dynamical Systems (MLDS) expressions. In the steel sheet processing line, the dynamics of sheets is represented by the differential (or difference) equation. On the other hand, some logical constraints such as change and/or inspection of the steel sheets are described by the discrete event-driven model. The proposed modeling method can harmoniously integrate these two different aspects, and can provide a suitable formulation for the optimization of the steel sheet processing line. Based on this hybrid system modeling, the closed-loop control can be realized by receding horizon scheme. Numerical examples demonstrate the usefulness of the proposed method.

Key Words: steel sheet processing line, Hybrid Petri Net (HPN), Mixed Logical Dynamical Systems (MLDS), Model-Based Predictive Control (MPC, MBPC)

1. はじめに

鉄鋼製品の中で薄板と呼ばれる製品は、連続鋳造で製造されたスラブと呼ばれる鋼片を圧延して製造する帯状の鋼板を指しており、自動車、家電製品、缶などの容器類など、身近な分野に多く使用されている。圧延は、加熱したスラブを熱間で圧延する熱間圧延と、それをさらに常温で薄く延ばす冷間圧延(冷延)からなる。自動車や家電に使われる鋼板は、ほとんどが冷延鋼板や、それに表面処理を施した鋼板である。

本論文では、鉄鋼製品の生産プロセスにおいて、冷延や表面処理など、半製品(製造段階の途中にある製品)を複数接続し、新たな処理を行なうライン(以降、連続処理プロセスと呼ぶ)を考察の対象とする。典型的な連続処理プロセスの動作および構成について述べる。この種のプロセスでは、半製品を投入し、処理設備で所望の処理を施した後、処理済の

(半)製品として回収する。処理設備では処理速度が製品の品質に影響を与えることがあり、その制御が制御目的の一つとなる。また、半製品を複数投入する場合、これから投入する鋼板をすでに投入されている鋼板と溶接する必要がある。この際、溶接点を停止(もしくは減速)させなければならない。ここで生じる速度差を吸収するために、バッファの役割を果たすルーパーと呼ばれる設備が溶接点と処理設備の間に設置される。処理後も同様に鋼板の切断などのため停止・減速させる必要があり、ここで生じる速度差を吸収するために処理設備の後にもルーパーが設置される。オペレータが、これから投入される鋼板の量などの先の状況を予測しながらルーパー内の鋼板の残量を制御することにより、安定した処理速度が実現可能となる。また、プロセス全体の目的は、上記の(部分的な)制御目的を満たしつつ、生産量を増加させることとなる。

ここで述べたように、連続処理プロセスラインでは操業上・設備上の制約範囲内で最大の速度を維持しつつ操業することで生産効率が向上する。しかし、ライン内には溶接機、ルーパー、処理設備、切断機などの複数の設備があり、それぞれに異なる制約条件が課されている。加えて、ある条件が成り立ったときに行なわなければならない処理(半製品の接続点がある点を通じたときの検査など)、さらに加減速・停止の条件(半製品接続時には一定時間停止することなど)が定められていることから、ライン全体の速度を最適に操作することは容易ではなく、現在はオペレータの経験に生産量が依存してい

* 名城大学理工学部 名古屋市天白区塩釜口 1-501

** 名古屋大学大学院工学研究科 名古屋市千種区不老町

*** JFE スチール株式会社 川崎市川崎区南渡田町 1-1

* School of Science and Technology, Meijo University, 1-501 Shiogamaguchi, Tenpaku-ku, Nagoya

** Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya

*** JFE Steel Corporation, 1-1 Minamiwatarida-cho, Kawasaki-ku, Kawasaki

(Received January 29, 2009)

(Revised June 18, 2009)

る。また、オペレータによる操業も、ライン停止のリスクを避けるため、余裕をとった保守的な方針が基本であり、設備の生産能力の上限を使っていないのが現状である。

このような動作の複雑性もあり、これまで連続処理プロセスに対しモデルベースの制御手法が適用された例は見当たらない。本論文では、連続処理プロセスのモデル化手法およびそれを用いた制御手法を提案する。

モデル化においては鋼板の流れを記述する必要があるが、液体とは異なり一つ一つ違う仕様(長さ、材質、必要な処理など)をもつ離散的な物体の流れであり、かつそれらが接続されていることを考慮する必要がある。また、前述の制約条件なども合わせて記述する必要がある。したがって、連続処理プロセスは連続値(鋼板の長さ、速度など)と離散事象(鋼板の接続、操業の各種制約条件)双方を含むハイブリッドシステムである。ハイブリッドシステムのモデル化手法として、ハイブリッドオートマトン^{1),2)}、区分線系システム³⁾などが知られているが、本論文では鋼板の流れを表わすことを考慮し、ハイブリッドペトリネット(Hybrid Petri Net, HPN)^{4),5)}を用いてモデル化する。ここ数年、さまざまな分野でHPNが用いられている^{6)~8)}が、鉄鋼の連続処理プロセスに適用した例は見当たらない。

HPNは設計者にとって直観的にわかりやすく、シミュレーションなどを行なうモデルとしては有用であるが、計算機上での最適化による制御問題の解決にはあまり適していない。この問題に対し、文献9)において、あるクラスのHPNが計算機上での最適化に向いているモデル化手法である混合論理動的システム(Mixed Logical Dynamical Systems, MLDS)¹⁰⁾に変換可能であることが報告されている。本論文でも鋼板処理プロセスのHPNモデルをMLDS形式に変換可能であることを示し、有限区間の最適制御を混合整数計画問題(Mixed Integer Programming Problem, MIP)に帰着する方法を示す。さらに、有限区間の最適制御を繰り返し行なうことで、モデル予測制御(Model-based Predictive Control, MPC)による制御系を構築する。

MLDS+混合整数計画によるハイブリッドシステムのモデル予測制御の(HPNを介さない)適用例はいくつか報告されており、ガス供給システム¹⁰⁾、コージェネ発電システム^{11),12)}、トラクションコントロール^{13),14)}、油圧プロセス¹⁵⁾などがある。

本論文の構成を以下に示す。第2章で対象とするラインをHPNでモデル化する手法を述べる。第3章ではMLDSの概要を述べ、その後HPNでモデル化したラインをMLDSへ変換する手法を述べる。第4章ではまず評価関数の設計法について述べ、数理計画法によるモデル予測制御の実装方法と安定性について述べる。第5章では提案手法の有効性を確認するための数値実験を行ない、最後に第6章で本論文の結論を述べる。

2. 連続処理プロセスのモデル化

2.1 対象ライン

Fig. 1 Continuous processing line

連続処理プロセスの典型例として、本論文ではFig.1のラインを用いて議論を進める。このラインは、鋼板を連続的に処理するラインであり、各設備にはそれぞれ長さ、速度、加速度の上下限が設備上の制約として定まっている。また、ループと呼ばれるバッファの長さは可変であり、前後の速度により時々刻々変化する。

鋼板は、ある程度の長さのコイルとしてペイオフリールに準備される。前のコイルがなくなったら、その終端とつぎのコイルの先端が溶接されラインに装入される。そして、入側ループ、処理槽、出側ループを通過した鋼板はテンションリールに巻き取られ、再びある程度の長さのコイルとして切断される。

このラインの主目的は処理槽で行なう処理であり、品質保持のため鋼板をできるだけ一定の速度で処理槽を通過させるのが望ましい。しかし、ペイオフリールでの新しいコイルの溶接、テンションリールでのコイル切断などのため、入側ループの前・出側ループの後で鋼板を減速させる必要がある。このようにして生じる入側・出側速度と処理槽の速度の差を吸収するため、二つ(入側・出側)のループを有効活用することが効率的なラインの運用に不可欠となる。

2.2 ハイブリッドペトリネット(HPN)

本論文では、まず始めにシステムをハイブリッドペトリネット(Hybrid Petri Net, HPN)^{4),5)}でモデル化する。本節ではハイブリッドペトリネットについて簡単に述べる。

ペトリネット(Petri Net, PN)^{16),17)}は、プレース、トランジションという二種類のノードをもつ二部有向グラフである。プレースには非負整数個のトークンが置かれ、プレースとトランジションがアークでつながれる。ペトリネットのそれぞれの要素を表わす記号をTable 1に示す。表中の“PN”の列がペトリネットで使われる要素である。

プレースに置かれたトークンの配置状況はマーキングと呼ばれ、システムの状態を表わす。プレース間をつなぐトランジションが発火すると、入力側(アークがトランジションへ伸びている)プレースからトークンが取り去られ、出力側(アークがトランジションから伸びている)プレースへトークンが移動する。Fig. 2にペトリネットの動作例を示す。トランジ

Table 1 Components of PN/HPN

	PN	HPN	
		Discrete	Continuous
Place	○	○	⊙
Transition	⊢	⊢	⊢
Token	●	●	Number
Arc	→	→	→

ションの発火によりシステムの状態であるマーキングが変化している。

Fig. 2 Example of Petri Net

ハイブリッドペトリネット (Hybrid Petri Net, HPN) は連続値を扱えるようペトリネットを拡張したものである。本論文では、First-Order Hybrid Petri Net⁴⁾を用いる。

HPN で用いられる要素は Table 1 の“HPN”の列に示されたものである。HPN では、連続プレースと連続トランジションがシステムの連続的な挙動を表わすために用いられる。また、ペトリネットで「プレース」「トランジション」と呼ばれていたものは、区別のために「離散プレース」「離散トランジション」と呼ばれる。

連続プレースとそのマーキングは、タンク中の液量、設備中の鋼板の量など、システムの連続的な状態を表わす。連続トランジションが発火すると、そのトランジションの入出力連続プレース間でトークンが移動する。それぞれの連続トランジションは、トークンの移動速度を表わす発火速度をもつ。発火速度の例として、二つのタンクをつなぐパイプ中を流れる液体の流量、設備間を流れる鋼板の速度などが挙げられる。

Fig. 3 に HPN の動作例を示す。連続トランジションが発火速度 $v = 5[\text{s}^{-1}]$ で発火したとすると、入力側のプレースから出力側のプレースへ単位時間当たりにトークンが 5 だけ移動する。

Fig. 3 Example of HPN

2.3 対象ラインのモデリング

Fig.1 のラインをハイブリッドペトリネットによりモデル化したものを Fig.4 に示す。ここで、連続プレース $p_{c,i} \in P_C = \{p_{c,1}, \dots, p_{c,5}\}$ はそれぞれの設備に対応している。また、連続プレース $p_{c,i}$ のマーキングを $x_{c,i}$ で表わす。この

Fig. 4 HPN model of the processing line

値は、 i 番目の設備に入っている鋼板の量である。

連続トランジション $t_{c,i} \in T_C = \{t_{c,1}, \dots, t_{c,4}\}$ は連続プレース間の鋼板の移動を表わし、 $v_{c,i}$ はその速度である。連続トランジションに割り当てられた離散プレース $p_{d,1} \in P_D$ とそのマーキング $x_{d,1} \in \{0, 1\}$ は連続トランジションの発火の可否を表わし、離散トランジション $t_{d,i} \in T_D = \{t_{d,1}, t_{d,2}\}$ により $x_{d,i}$ が変化する。離散トランジションの発火を、 $u_{d,i} \in \{0, 1\}$ で表わす。

連続プレースと連続トランジションの接続関係により、ペイオフリールからテンションリールまで一方向に流れる鋼板の動きを表わすことができている。また、 $t_{c,1}$ につけられた離散プレースはペイオフリール・入側ループ間での鋼板溶接のための停止を表わしている。

HPN によるモデル化の利点は、実際の設備の接続関係を視覚的に把握しやすいことであり、後述する MLDS へのインタフェースとして非常に有効である。

3. MLDS による HPN モデルの代数表現

3.1 MLDS の概要

MLDS (Mixed Logical Dynamical System) は、ハイブリッドダイナミカルシステムの表現の一種であり、論理的・連続的なふるまいを統一的に表現できることがその特徴である¹⁰⁾。

一般的な MLDS は次式で表わされる。

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_1\mathbf{u}(k) + \mathbf{B}_2\delta(k) + \mathbf{B}_3\mathbf{z}(k) \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}_1\mathbf{u}(k) + \mathbf{D}_2\delta(k) + \mathbf{D}_3\mathbf{z}(k) \quad (2)$$

$$\mathbf{E}_2\delta(k) + \mathbf{E}_3\mathbf{z}(k) \leq \mathbf{E}_1\mathbf{u}(k) + \mathbf{E}_4\mathbf{x}(k) + \mathbf{E}_5 \quad (3)$$

ここで、 $k \in \mathbf{Z}$ は離散値時間、 $\mathbf{x}(k) \in \mathbf{R}^n$ は連続値状態変数、 $\mathbf{u}(k) \in \mathbf{R}^p$ は連続値入力変数、 $\mathbf{y}(k) \in \mathbf{R}^l$ は連続値出力変数、 $\delta(k) \in \{0, 1\}^m$ は補助論理変数、 $\mathbf{z}(k) \in \mathbf{R}^q$ は連続値補助変数、 $\mathbf{A}$ から $\mathbf{E}_5$ は適切な次元をもつ行列である。(3) 式の不等号は各要素ごとの比較である点に注意されたい。

MLDS による表現は、通常の離散時間の状態方程式を基として、二種類の補助変数 δ と $\mathbf{z}$ を導入し、システムにおける論理や制約条件を表現するための線形行列不等式 (3) 式を加えたものである。MLDS の特徴の一つとして、補助論理変数 δ を介して論理式を不等式に変換していることがあげられ

る. この変換のための基本的なルールのいくつかを以下に紹介する.

以下の論理式を例とする.

$$[f(x) \geq a] \Leftrightarrow [\delta = 1] \quad (4)$$

ここで, a は定数である. この論理式は (5) 式と (6) 式で表わされる等価な不等式に変換できる.

$$-f(x) + (a - m)\delta + m \leq 0 \quad (5)$$

$$f(x) - (M - a + \varepsilon)\delta - a + \varepsilon \leq 0 \quad (6)$$

ただし, $M = \max_x f(x)$, $m = \min_x f(x)$ であり, $\varepsilon > 0$ は十分に小さな正の定数である. (5), (6) 式は δ にそれぞれ 0 と 1 を代入すれば (4) 式と等価であることは容易に確かめられる.

また, $\delta f(x)$ のような論理変数と連続値関数の積の項が現われた場合, 補助変数 $z = \delta f(x)$ を導入することで, 線形表現に変換できる. しかも $z = \delta f(x)$ の関係は以下の論理式に変換可能であり,

$$[\delta = 0] \Rightarrow [z = 0], \quad [\delta = 1] \Rightarrow [z = f(x)] \quad (7)$$

最終的に以下の等価な不等式に変換される.

$$\begin{aligned} z &\leq M\delta, \quad -z \leq -m\delta \\ z &\leq f(x) - m(1 - \delta) \\ -z &\leq -f(x) + M(1 - \delta) \end{aligned} \quad (8)$$

これ以外の論理演算 ($\wedge, \vee$ など) の変換方法については文献 10) を参照されたい.

3.2 対象ラインの MLDS への変換

本節では, Fig.4 の処理ラインの MLDS 表現を導く.

3.2.1 溶接点の定義

Fig.4 で示したモデルでは, 各設備中の鋼板の総量のみに着目しており, 鋼板の種類情報は含まれていない. 実際の運用では鋼板の溶接, 切断, 溶接点付近での検査などが行なわれるため, 溶接点の情報が必須である.

本論文では, 鋼板が最大 3 枚溶接されたものがラインの中に存在すると仮定する. 3 枚の鋼板は Fig.5 のように溶接されており, 左から右に向かってラインの中を移動する. コイル 3 の末端を原点とし, コイル 3 と 2 の溶接点を c_2 , コイル 2 と 1 の溶接点を c_1 と定義する. たとえば, コイル 1 から 3 がそれぞれ 700 m, 600 m, 500 m だとすると, $c_1 = 1100$ m, $c_2 = 500$ m となる.

3.2.2 状態方程式

連続マーキングの状態方程式は次式となる. この式は Fig. 4

Fig. 5 Welding points

の連続プレースと連続トランジションとの接続関係から自動的に導くことができる.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_{c,1} \\ \vdots \\ x_{c,5} \end{bmatrix} (k+1) &= \begin{bmatrix} x_{c,1} \\ \vdots \\ x_{c,5} \end{bmatrix} (k) \\ &+ T_s \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{c,1} \\ \vdots \\ v_{c,4} \end{bmatrix} (k), \end{aligned} \quad (9)$$

$$\Leftrightarrow \mathbf{x}_c(k+1) = \mathbf{x}_c(k) + \mathbf{D}_c \mathbf{v}_c(k), \quad (10)$$

ここで, T_s はサンプリング時間である.

同様に, 離散マーキングの状態方程式は次式となる.

$$x_{d,1}(k+1) = x_{d,1}(k) + \begin{bmatrix} -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{d,1} \\ u_{d,2} \end{bmatrix} (k), \quad (11)$$

$$\Leftrightarrow \mathbf{x}_d(k+1) = \mathbf{x}_d(k) + \mathbf{D}_d \mathbf{u}_d. \quad (12)$$

3.2.3 制約条件

HPN において連続・離散トランジションが発火可能, つまり, $v_{c,i} \geq 0, u_{d,i} \geq 0$ となるための条件は以下のとおりである.

- 連続トランジション
 - 入力連続プレースのマーキングが 0 より大きい
 - 入力離散プレースのマーキングが 1
 - 出力連続プレースのマーキングが最大値より小さい
- 離散トランジション
 - 入力離散プレースのマーキングが 1
 - 出力離散プレースのマーキングが 0

トランジションが入力/出力プレースをもたない場合は対応する条件は無視される.

たとえば, 離散トランジション $t_{d,1}$ が発火可能となる条件は以下の論理式で表わされる.

$$[u_{d,1} = 1] \rightarrow [x_{d,1} = 1], \quad [u_{d,2j} = 1] \rightarrow [x_{d,1} = 0], \quad (13)$$

また, 上記の条件は本研究で対象としているラインに限らず, HPN でモデル化されるものすべてに共通なものである. さらに, 処理ラインにはさまざまな運用上の制約がある.

- 各設備の容量の上下限

各設備には容量の上下限が決まっており, それらは $x_{c,i}(k)$

に対する不等式となる.

- 各設備の速度の上下限

各設備が材料を流せる速度には上下限が決まっており, それらは $v_{c,i}(k)$ に対する不等式となる.

- 各設備の加減速の上下限

各設備の加減速には上下限が決まっており, それらは $v_{c,i}(t) - v_{c,i}(t-1)$ に対する不等式となる.

- 溶接と検査に関する制約

ペイオフリールにある鋼板の長さが少なくなり, ある範囲 $[c_i + \underline{c}_{po}, c_i + \overline{c}_{po}]$ ($i = 1, 2$) に入った場合, 新しいコイルとの溶接とその検査のため, ペイオフリールからの鋼板の払い出しを一定時間 $\tau[s]$ だけ停止する必要がある.

もしも溶接と検査が必要となった場合, $t_{d,1}$ を発火させて $x_{d,1} = 0$ とし, 払い出しを禁止する. $\tau[s]$ 後, $t_{d,2}$ を発火させて $x_{d,1} = 1$ とし, 払い出しを許可する. この条件は下記の論理式で表わされる.

$$\begin{aligned} & [x_{c,1}(k) - \overline{c}_{po} \leq c_i \leq x_{c,1} - \underline{c}_{po}] \wedge [x_{d,1}(k) = 1] \\ & \rightarrow [[u_{d,1}(k) = 1] \rightarrow [u_{d,2}(k + \Delta) = 0]], \\ & i = 1, 2, \Delta = 1, 2, \dots, \tau \end{aligned} \quad (14)$$

- 出側製品検査に関する制約

出側の製品検査では, コイルの先端と尾端 (溶接点の前後) でシャーカットおよび目視検査を行なうため, その区間では速度を一定値以下に落とさなければならない.

$$\begin{aligned} & [c_i + \underline{c}_{check} \leq \sum_{j=1}^4 x_{c,j}(k) \leq c_1 + \overline{c}_{check}] \\ & \rightarrow [0 \leq v_{c,4}(k) \leq \overline{v}_{c,4,check}], \end{aligned} \quad (15)$$

ここで, $[c_i + \underline{c}_{check}, c_i + \overline{c}_{check}]$ ($i = 1, 2$) は目視検査を行なう範囲であり, $\overline{v}_{c,4,check}$ は目視検査時の最高速度である.

ここで示した制約式を等価な線形不等式に変換し, 状態方程式 (9), (11) と組み合わせると MLDS 形式のモデル表現が得られる.

4. 混合整数線形計画法による最適化

4.1 評価関数の設計

制御系を MLDS として定式化したことの利点は, 論理制約と連続変数とが混在した系に対し, ある種の最適性指標のもとで制御方策を決定できる点である. 本研究では, 対象ラインの処理速度を最大化し, かつ設備に対する悪影響を抑えるという観点から, 以下の二つの評価関数を状況に応じて切り替えて最適化を行なう. J_1 は通常の運用時に, J_2 はコイルの残量が少なくなり, 新たなコイルとの溶接が近いときに用いる評価関数である.

$$J_1 = T_s \sum_{k=0}^{K-1} (v_{c,2}(k) + \alpha v_{c,1}(k) + \beta v_{c,4}(k)) - \gamma J_{\Delta v} \quad (16)$$

$$J_2 = T_s \sum_{k=0}^{K-1} (v_{c,2}(k) + \alpha e^{-dk} v_{c,1}(k) + \beta v_{c,4}(k)) - \gamma J_{\Delta v} \quad (17)$$

$$J_{\Delta v} = T_s \sum_{k=0}^{K-1} (|v_{c,2}(k+1) - v_{c,2}(k)| + |v_{c,4}(k+1) - v_{c,4}(k)| + |v_{c,1}(k+1) - v_{c,1}(k)|) \quad (18)$$

これらの評価関数について, まず, 共通の部分から述べる. $v_{c,2}, v_{c,1}, v_{c,4}$ は処理槽での速度, 入側ルーパーへの入力速度, 出側ルーパーからの出力速度をそれぞれ表わしている. また, T_s は制御周期, K はモデル予測制御における予測区間 (ホライゾン) の長さ, α, β, γ は重みをそれぞれ表わしている.

評価関数の前半の項は, 各速度の合計となっており対象ラインの処理速度最大化に当たる部分である. また, 後半の項 $J_{\Delta v}$ は速度の変化に対するペナルティの項となっており, 実際の設備では悪影響を及ぼすであろう激しい速度変化を抑制するための項になっている. これら評価関数を最大化する問題は, 決定変数に連続値と離散値 (整数) を含む混合整数計画問題として定式化できる.

ここで, 評価関数 J_2 で入側ルーパーの速度に付加されている項 e^{-dk} ($d \geq 0$) について述べる. 制御目的は各設備間の速度を最大化することであり, この目的を達成するための評価関数が J_1 である. しかし, コイルが残り少なくなった場合はつぎのコイルとの溶接に備え, 入側ルーパーにある程度の鋼板をためつつ減速する必要がある. この減速の部分では, 溶接の直前まで速い速度で鋼板を流し, その後最大減速するのが望ましい. しかし, この動作は速度の最大化・加減速へのペナルティという J_1 の性質とは全く異なるため, J_1 のみを用いては実現が難しい.

そこで, 時間と共に減少する関数 e^{-dk} ($d \geq 0$) を入側の速度に付加することにより, 望ましい動作が得られるよう評価関数を変更したものが J_2 である.

このように, 通常 (コイルの残量が多い) の場合とコイルの残量が少ない場合では望ましい動作の性質が異なるため, 一つの評価関数で同時に目標を達成するのは難しい. そのため, 本研究では状況に応じて二つの評価関数を切り替えて最適化を行なう手法を採用する.

4.2 モデル予測制御 (MPC)

プロセスの動的モデルが存在すれば, そのモデルに基づいて未来の被制御量の変化を予測できるので, 被制御量と設定値が

一致するような操作量を求めることが可能である。このことを利用したのがモデル予測制御 (Model Predictive Control, MPC) である¹⁸⁾。MPCは、未来の制御量の予測値を求め、予測区間において予測値が制御要求にできるだけ近づくように制御入力を決出し、得られた制御入力のうちいくつかの入力値のみを入力する制御法である。

通常の MPC では入力は 1 サンプル (1 制御周期分) のみを用いることが多いが、本論文では複数サンプル利用するように拡張したものを適用する。ここで、入力を適用する区間の長さを入力印加区間と定義する。たとえば、制御周期 1s、予測区間 30s、入力印加区間 5s であれば、30 秒先までの予測による最適化を行ない、得られた結果のうち最初の 5s を入力として印加する。つぎの最適化が始まるのは 5s 後である。

4.3 MPC の安定性について

MPC は予測区間外で起こる事柄に対して何も保障できない方策であるため、安定な制御対象に MPC を適用した場合でも制御対象を最終的に安定化できない状況に追いやってしまう可能性が考えられる¹⁸⁾。したがって、MPC を適用した閉ループ系が安定になることを示すことが実用上重要になる。

制御対象の状態方程式は (10) 式で表わされる。酸洗ラインでは一部の変数の値を目標値に制御する (その他の変数に対しては、制約条件は与えられるが目標値は設定されない) ため、その変数を次式で定義する。

$$z(t) = Cx(t) \quad (19)$$

さらに、その目標値を $z_e = Cx_e$ とする。最終的な巻き取り量を目標値に制御したい場合は、 C, z_e は次式で与えられる。

$$C = [0 \cdots 0 \ 1], \quad z_e = Cx_e \quad (20)$$

この制御対象は基本的に積分器の直列結合である。MPC により制約を満たす速度が得られると仮定すると、 $0 \leq x_{c,5} \leq z_e, 0 \leq v_{c,4}$ なので、

$$z(t+1) = x_{c,5}(t) + T_s v_{c,4}(t) \geq z(t) \quad (21)$$

となり、 $z(t)$ は z_e まで単調増加することがわかる。

したがって、 $V(t) = (z_e - z(t))^2$ と定義すると、 $V \geq 0$ で、等号が成り立つのは $z(t) = x_{c,5}(t) = z_e$ のときのみであり、さらに

$$\begin{aligned} \Delta V(t) &= V(t+1) - V(t) \\ &= (z(t+1) - z_e)^2 - (z(t) - z_e)^2 \\ &\leq 0 \\ &(\because z(t+1) \geq z(t), z(t) \leq z_e) \end{aligned} \quad (22)$$

が成り立つため、 V はリアプノフ関数である。したがって、この系のリアプノフ安定性が保証される。

5. モデル予測制御のシミュレーション

本章では、前述の議論に基づいて構成したモデル予測制御

系のシミュレーション結果を示す。

5.1 最適化ツール

対象ラインを混合整数線形計画法を用いて最適化を行なった。最適化のソフトウェアとして、NUOPT¹⁹⁾を用いた。また、使用した PC の主な仕様は CPU: Intel Xeon 3 GHz、メモリ: 3.25 GB である。

5.2 最適化結果

投入するコイルの初期配置および順序を **Table 2**、固定のパラメータを **Table 3** とした。コイルの初期配置、投入順序およびサンプリング間隔 T_s は現在稼働している鋼板処理プロセスを参考としている。一方、重み (α, β, γ) および減衰項 (d) はシミュレーションを繰り返したのち選定したものである。

この条件下で、予測区間 (ホライズン)、入力印加区間 (入力を利用する区間) の長さを変更してシミュレーションを行なった。最適解が簡単に得られない場合に対応するため、1 回の最適化にかけられる最大の時間を 300s とし、その場合は準最適な実行可能解を用いることとした。

代表的な結果を **Fig. 6, 7** に示す。

Fig. 6, 7 は予測区間の長さを変えた結果であり、どちらも制約を満たしつつ操業が行なわれている。二つの結果の差については次節で考察する。

5.3 パラメータに対する解析

予測区間、入力印加区間を変更したシミュレーションを行ない、性能 (スループット) と計算時間にどのような影響があるかを調べた。**Fig. 8** にスループットおよび最適化 1 回あた

Table 2 Coil length[m]

Initial	$x_{c,1}$	$x_{c,2}$	$x_{c,3}$	$x_{c,4}$	$x_{c,5}$
Coil 1	0	0	33	100	567
Coil 2	120	300	280	0	0
Coil 3	700	0	0	0	0
Subsequent					
Coil 4 to 8	850, 900, 800, 950, 900				

Table 3 Parameters

Sampling interval T_s [s]	1
Weights (α, β, γ)	(1, 1, 0.01)
Decaying factor d	1

Fig. 6 Result (horizon:35, input interval: 5)

Fig. 7 Result (horizon:59, input interval: 5)

りの計算時間を示す。両図とも横軸は予測区間 (ホライズン) であり, 入力印加区間 (2 から 15) ごとに結果をプロットしている。

Fig. 8 Throughput and average of computation time

Fig.8 より, スループットについてはホライズンが長くなるか, 入力印加区間が長くなるにつれて減少する傾向があることがわかる。

予測区間が長くなることにより, 減速の制約が予測の中に入ってくるのが早くなり, それに応じて早めに減速する入力 that 得られやすくなる。Fig.7 では出側速度が段階的に減速する部分が現われ (700 秒付近など, Fig.6 では現われていない), それによりスループットが減少している。また, 入力印加区間が長くなると入力を修正する機会が減るため, スループットは減少する。

同じ図より, 予測区間が長くなると平均計算時間も長くなっていることがわかる。これは MIP の整数変数が予測区間に応じて増大するのが主な原因である。また, 入力印加区間が長くなると平均計算時間が長くなっている。これは, 計算時間が非常にかかる状況 (具体的には, コイルの溶接の前後) の回数はさほど変わらないが, 入力印加区間が長くなると最適化の回数が減少することが主な原因である。

最適化に要する時間について, Fig.6 の結果を得るのに要した時間を Fig.9 上段に示す。下段は同じ結果の一部を拡大したものである。この結果より, 長く時間がかかる状況は限られており, ほとんどの場合で入力印加区間である 5 秒以内に最適化が終わっていることがわかる。つまり, ほとんどの

状況で, 今後 5 秒の制御入力を決定するのに要した時間が 5 秒未満であり, 実時間での運用の可能性を示した結果となっている。

今回の制御対象での入力印加区間・予測区間の適切な値として, スループットを確保しつつ (Fig. 8 上段で 6000 付近) 平均計算時間が入力印加区間以内に収まっているものを選ぶと, 入力印加区間: 5 s, 予測区間: 30 s から 35 s 程度となる。

Fig. 9 Optimization time

6. 結 論

本論文では, 連続鋼板処理ラインを HPN, MLDS でモデル化し, 数値計画法によるモデル予測制御の実装法を提案した。シミュレーション結果から, 適切なパラメータを選ぶことで提案手法により連続鋼板処理ラインのモデル予測制御が実現可能であることが確認された。

一部最適化に長時間要する場合があるが, いずれの状況にも共通点があり, これを利用してデータベースを事前に作成するなどの対処法が考えられる。また, モデルと実プラントの誤差がある場合に提案手法が有効であるか検証することなどが今後の課題である。

参 考 文 献

- 1) T.A. Henzinger: The theory of hybrid automata, *Proc. of the 11th Annual IEEE Symposium on Logic in Computer Science (LICS96)*, 278/292 (1996)
- 2) M.S. Branicky, V.S. Borkar and S.K. Mitter: A unified framework for hybrid control: Model and optimal control theory, *IEEE Trans. on Automatic Control*, **43**-1, 31/45 (1998)
- 3) E.D. Sontag: Nonlinear regulation: The piecewise linear approach, *IEEE Trans. on Automatic Control*, **26**-2, 346/358 (1981)
- 4) F. Balduzzi, A. Guia and G. Menga: First-order hybrid petri nets: A model for optimization and control, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, **16**, 382/399 (2000)
- 5) L. Ghomri and H. Alla: Modeling and analysis using hybrid Petri nets, *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, **1**, 141/153 (2007)
- 6) S. Guan, M. Nakamura, T. Shikanai and T. Okazaki: Hybrid Petri nets modeling for farm work flow, *Computers and electronics in agriculture*, **62**, 149/158 (2008)
- 7) A. Di Febbraro and N. Sacco: On modelling urban transportation networks via hybrid Petri nets, *Control engineering practice*, **12**, 1225/1239 (2004)
- 8) F. Kaakai, S. Hayat and A.E. Moundi: A hybrid Petri nets-based simulation model for evaluating the design of

railway transit stations, *Simulation Modelling Practice and Theory*, **15**, 935/969 (2007)

- 9) J. Júlvés, A. Bemporad, L. Recalde and M. Silva: Event-driven optimal control of continuous petri nets, *Proceedings of the 43rd IEEE Conference on Decision and Control*, 69/74 (2004)
- 10) A. Bemporad and M. Morari: Control of systems integrating logic, dynamics and constraints, *Automatica*, **35**-3, 407/427 (1999)
- 11) G. Ferrari-Trecate, E. Galleste, P. Litizia, M. Spedicato, M. Morari and M. Antoine: Modeling and control of co-generation power plants: A hybrid system approach, *Hybrid systems: computation and control 2002, Lecture Notes in Computer Science 2289*, 209/224, Springer-Verlag, Berlin (2002)
- 12) G. Ferrari-Trecate, E. Galleste, P. Letizia, M. Spedicato and M. Morari: Modeling and control of co-generation power plants: A hybrid system approach, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, **12**-5, 694/705 (2004)
- 13) F. Borrelli, A. Bemporad, M. Fodor and D. Hrovat: A hybrid approach to traction control, *Hybrid systems: computation and control 2001, Lecture Notes in Computer Science 2034*, 162/174, Springer-Verlag, Berlin (2001)
- 14) F. Borrelli, A. Bemporad, M. Fodor and D. Hrovat: An MPC/hybrid system approach to traction control, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, **14**-3, 541/551 (2006)
- 15) W. Colmenares, S. Cristea, C. De Prada and T. Villegas: MLD systems: modeling and control. experience with a pilot process, *Proc. of the 2001 IEEE International Conference on Control Applications*, 618/625 (2001)
- 16) J. Peterson: *Petri net theory and the modeling of systems*, Prentice-Hall (1992)
- 17) 村田忠夫: ペトリネットの解析と応用, 近代科学社 (1992)
- 18) J.M. Maciejowski(著), 足立修一, 菅野政明(訳): モデル予測制御—制約のもとでの最適制御 (Predictive Control with Constraints), 東京電機大学出版局 (2005)
- 19) 株式会社 数理システム, NUOPT: <http://www.msi.co.jp/nuopt/>

[著者紹介]

小中英嗣 (正会員)

1978年生まれ。2005年名古屋大学大学院博士後期課程電子情報学専攻修了。工学博士。同年名城大学理工学部講師, 2007年同助教, 2009年同准教授, 現在に至る。信号・記号ハイブリッドシステム論とその実システムへの応用に関する研究に従事。2008年計測自動制御学会奨励賞を受賞。電気学会, 電子情報通信学会, IEEEの各会員。

鈴木達也 (正会員)

1964年1月3日生まれ。91年名古屋大学大学院博士課程後期課程電子機械工学専攻修了。工学博士。同年名古屋大学工学部助手, 2000年同助教授, 2006年同教授, 現在に至る。この間, 98年から1年間, U.C.Berkeley 客員研究員。ハイブリッドシステム論・離散事象システム論に基づくメカトロニクスの知能化に興味をもつ。95年電気学会論文賞, 2008年 ICCAS Outstanding paper award, 2009年計測自動制御学会論文賞・友田賞などを受賞。電気学会, システム制御情報学会, 日本ロボット学会, 日本機械学会, IEEEの各会員。

浅野一哉 (正会員)

1981年東京大学工学部計数工学科卒業, 83年同大学院工学系研究科計数工学専攻修士課程修了。同年川崎製鉄(株)入社。鉄鋼プロセス制御の研究開発に従事。2003年 NKK との統合により JFE 技研(株), 2009年組織変更により JFE スチール(株)計測制御研究部主任研究員, 現在に至る。この間, 93~94年 California Institute of Technology, 94~95年 Swiss Federal Institute of Technology (ETH) 客員研究員。博士(工学)。95年本学会技術賞・友田賞, 2000年同論文賞受賞。日本鉄鋼協会の会員。

飯島慶次 (正会員)

1991年東京工業大学工学部制御工学科卒業, 93年同大学院理工学研究科制御工学専攻修士課程修了。同年日本鋼管(株)入社。鉄鋼プロセス制御の研究開発に従事。川崎製鉄(株)との経営統合により, 現在 JFE スチール(株)東日本製鉄所(京浜地区)制御部制御技術室主任部員。日本鉄鋼協会の会員。