

[別刷]

システム/制御/情報

Vol. 46

No. 03

2002

ISCIIE

システム制御情報学会

ハイブリッドシステムの予測制御とそのプロセス制御への適用

浅野 一哉*・津田 和呂†・Alberto BEMPORAD‡・Manfred MORARI‡

1. はじめに

従来、プロセス制御には製品品質や歩留まりの向上、生産率の向上などを目的としてさまざまな制御理論が適用されてきた。適用例の多くは定常状態にあるプロセスの制御を目的とするものであり、定常状態において線形化したプロセスモデルを用いて制御系設計を行っていた。ところが、実際のプロセスでは、定常状態の前後に必ず非定常状態が存在する。非定常状態では、ヒューリスティックなルールや操作パターンに基づく制御が適用されることが多く、フィードバック制御主体の定常状態に移行する際には制御モードの切り替えが生じる。また、プロセスの出力が「熱い」、「冷たい」のような linguistic な変数で離散的に表されている場合や、モータのノッチ制御やスイッチの ON/OFF による制御のように操作量が離散値となる場合もある。

このような、ルールに基づく制御、制御モードの切り替えを伴う制御、入出力が離散値をとる制御などは、連続的なダイナミクスと離散的な状態が混在するハイブリッドシステムと考えることができる。これらを統一的に扱う枠組みとして、ハイブリッドシステムを MLD (Mixed Logical Dynamical) システムとして定式化し、それに対して Receding horizon 法を適用して混合整数計画法の問題に帰着させるアプローチ [1,2] が注目を集めている。

本稿では、プロセス制御におけるハイブリッドシステムのアプローチへの期待、前述のアプローチの概要、およびガス供給システム最適化への適用シミュレーションについて述べる。

2. プロセス制御におけるハイブリッドシステムのアプローチへの期待

鉄鋼プロセスを概観すると、各プロセスにおいて定常状態の操業が長時間継続することは少なく、操業状態が時間とともに切り換えられることがほとんどである。

溶銑を製造する高炉では、炉内の化学反応は連続的に

生じているが、上部からの原料の装入、下部からの溶銑の取り出しはある時間間隔で離散的に行われる。高炉に吹き込む熱風を製造する熱風炉では、ガスを燃焼させて炉壁のレンガを加熱する期間と、燃焼を止めて空気を炉内に吹き込み熱風を得る期間とを複数の炉に対して順次切り換えている。溶銑から溶鋼を製造する転炉はバッチプロセスである。溶鋼を鑄型で連続して凝固させる連続鑄造では、連鑄操業の切れ目に非定常状態となる。圧延では、材料 1 本 1 本の先尾端の圧延が非定常部となる。

このようなプロセスでは、非定常部と定常部には異なる制御を適用するのが一般的である。圧延でいえば、圧延の前にロールの回転速度やロールギャップをプリセットするセットアップ制御を行い、材料が各スタンドに噛み込んで所定の条件が満たされた後、種々のフィードバック制御が開始されて定常状態の圧延へ移行する。フィードバック制御開始までの非定常状態では、ヒューリスティックなルールや操作パターンに基づく制御が中心となる。

このように、実プロセスの制御系は離散的事象と連続的なダイナミクスとが混在するシステムであるにもかかわらず、それを包括的に取り扱うことは行われていなかった。数多くの制御理論適用の試みのほとんどが既存の定常状態のコントローラを新たなコントローラで置き換えるものであり、既存の制御系の性能がある程度満足できるものであれば、新制御系適用による改善代も限られていた。これに対して、プロセスをハイブリッドシステムとしてとらえるアプローチを取れば、非定常部を含めた全操業期間にわたる操作量の最適化が行える可能性がある。また、離散的な入出力を直接的に取り扱ったり、モデルベースの制御と経験に基づくルールベースの制御を融合させたりすることにより、これまで制御理論の適用対象外と考えられていたプロセスにおいても理論に基づく制御系が導入できる可能性が出てくる。

本稿で紹介するアプローチでは、ハイブリッドシステムとして定式化された制御問題に対し、モデル予測制御の基本的な概念である Receding horizon 法を適用して操作量を求めている。モデル予測制御は、企業の現場から生まれてきた実用的な制御手法としてプロセス制御の分野に広く浸透しており、技術者にもなじみが深い。モデル予測制御の大きな特徴は、(1) 有限区間の最適化問

* 川崎製鉄 (株) 技術研究所

† NKK (株) 基盤技術研究所

‡ ETH-Swiss Federal Institute of Technology

Key Words: hybrid systems, predictive control, process control, mixed-integer programming, optimization problems.

問題を制御周期ごとに繰り返し解くこと、(2) その際、制約条件を陽な形で取り扱うこと、である。制御問題を制約条件を含む最適化問題に帰着させることができれば、それがハイブリッドシステムの問題であったとしてもモデル予測制御が適用でき、同制御の数々の利点をそのまま活用することができる。これはモデル予測制御の懐の深さを表すものでもあり、このアプローチが注目されるゆえんである。

3. MLD システム

3.1 論理式の不等式群による置換

MLD (Mixed Logical Dynamical) システムとは、その名が示している通り、論理記述を含んだ動的システム表現方法であり、プロセスに含まれる離散的な事象を論理変数で表している。その定式化では、論理式を線形不等式で表現することが特徴である。本節では、その準備として、論理式から線形不等式への置換例を二つ示す。論理式においては、“ \neg ”(NOT)、“ \wedge ”(AND)、“ \vee ”(OR)、“ \rightarrow ”(IMPLY)、“ \leftrightarrow ”(IF AND ONLY IF)、“ \oplus ”(XOR)等の演算子が用いられるが、これらの演算結果を表したのが第 1 表である。

第 1 表 真理値表

X_1	X_2	$\neg X_1$	$X_1 \vee X_2$	$X_1 \wedge X_2$	$X_1 \rightarrow X_2$	$X_1 \leftrightarrow X_2$	$X_1 \oplus X_2$
F	F	T	F	F	T	T	F
F	T	T	T	F	T	F	T
T	F	F	T	F	F	F	T
T	T	F	T	T	T	T	F

この真理値表に関して、次の二つの等価関係は重要である。

$$(X_1 \rightarrow X_2) \Leftrightarrow (\neg X_1 \vee X_2) \quad (1a)$$

$$(X_1 \leftrightarrow X_2) \Leftrightarrow (X_1 \rightarrow X_2) \wedge (X_2 \rightarrow X_1) \quad (1b)$$

ここで、記号“ \Leftrightarrow ”は“等価である”ことを表す。さて、次の論理命題 X を考える。

$$X \triangleq \{f(x) \leq 0\}$$

ただし、 $f: \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}$ は線形関数とする。また、 $f(x)$ の値域を

$$m \leq f(x) \leq M \quad (2)$$

と仮定する。理論的には $m(M)$ の過小(過大)評価は問題ないが、値域の範囲をより狭く見積もる方が、後の計算負荷を低くすることができる。ここで、命題 X の真偽を 0-1 変数 δ で関連づけることを考えてみよう。以降の式変形の準備として、次の三つの等価関係は容易に導出できる。

$$\{f(x) \leq 0\} \vee \{\delta = 1\} \Leftrightarrow f(x) \leq M\delta \quad (3)$$

$$\{f(x) \geq 0\} \vee \{\delta = 1\} \Leftrightarrow m\delta \leq f(x) \quad (4)$$

$$\neg\{f(x) \leq 0\} \Leftrightarrow f(x) \geq \varepsilon \quad (5)$$

最後の(5)式において ε は微小正数である。ここからが本題であるが、まずは命題 X の真偽を 0-1 変数である δ により、

$$\{f(x) \leq 0\} \leftrightarrow \{\delta = 1\} \quad (6)$$

と関連づける。このとき、(1a) および (3) 式より

$$\begin{aligned} & \{f(x) \leq 0\} \leftrightarrow \{\delta = 1\} \\ & \Leftrightarrow \{f(x) \leq 0\} \vee \neg\{\delta = 1\} \\ & \Leftrightarrow \{f(x) \leq 0\} \vee \{(1-\delta) = 1\} \\ & \Leftrightarrow \{f(x) \leq M(1-\delta)\} \end{aligned} \quad (7)$$

となる。また、同様に(1a)、(4)、(5)式により

$$\begin{aligned} & \{f(x) \leq 0\} \rightarrow \{\delta = 1\} \\ & \Leftrightarrow [\neg\{f(x) \leq 0\} \vee \{\delta = 1\}] \\ & \Leftrightarrow [\{f(x) - \varepsilon \geq 0\} \vee \{\delta = 1\}] \\ & \Leftrightarrow \{f(x) - \varepsilon \geq (m - \varepsilon)\delta\} \end{aligned} \quad (8)$$

が成り立つ。したがって、(1b)、(7)、(8)式より、(6)式で表される関連づけは、

$$\begin{cases} f(x) \leq M(1-\delta) \\ f(x) \geq \varepsilon + (m - \varepsilon)\delta \end{cases} \quad (9)$$

なる線形不等式群と等価なことがいえた。

次の置換例は、0-1 変数 δ と、先の線形関数 $f(x)$ の積

$$y \triangleq \delta f(x) \quad (10)$$

により新たな補助変数 y を導入する場合に適用可能なものである。(10)式は、

$$\begin{cases} \{\delta = 0\} \rightarrow \{y = 0\} \\ \{\delta = 1\} \rightarrow \{y = f(x)\} \end{cases} \quad (11)$$

と等価である。(11)式は、(1a)、(3)、(4)式を適用することにより、前述の例と同様、

$$\begin{cases} y \leq M\delta \\ y \geq m\delta \\ y \leq f(x) - m(1-\delta) \\ y \geq f(x) - M(1-\delta) \end{cases} \quad (12)$$

なる等価表現が可能である。本来非線形な表現である(10)式が、線形不等式群である(12)式と等価なことがいえた。

3.2 MLD システムの一例

MLD システムの一般形を与える前に、導入として次に示すような区分的に線形なシステムが MLD システムとしてどう表現されるかを考える。

$$x(t+1) = \begin{cases} 0.8x(t) + u(t) & \text{if } x(t) \geq 0 \\ -0.8x(t) + u(t) & \text{if } x(t) < 0 \end{cases} \quad (13)$$

(13) 式の表現では、内部状態 $x(t)$ の符号によって場合分けが行われているため、全空間を一括して扱って制御系設計を行うのは困難である。そこで、(13) 式を場合分けを含まない線形な表現に変換することを考えよう。ここでは、たとえば物理的な制約から

$$-10 \leq x(t) \leq 10$$

かつ

$$-1 \leq u(t) \leq 1$$

なる状況であったと仮定する。表現変換の第一歩は、 $x(t)$ の符号を 2 値補助変数 δ を用いて、

$$\begin{cases} [\delta(t) = 1] \leftrightarrow [x(t) \geq 0] \\ [\delta(t) = 0] \leftrightarrow [x(t) < 0] \end{cases} \quad (14)$$

と関連づけることである。これにより、場合分けを含む (13) 式は単一式である (15) 式のような書き換えが可能となる。

$$x(t+1) = 1.6\delta(t)x(t) - 0.8x(t) + u(t) \quad (15)$$

さて、(15) 式は単一式にはなったが、その前提となる (14) 式が新たに導入されてしまった。そこで、前節の最初の置換例を用いて、(14) 式を

$$\begin{cases} -m\delta(t) \leq x(t) - m \\ -(M+\varepsilon)\delta(t) \leq -x(t) - \varepsilon \end{cases} \quad (16)$$

と不等式表現に書き換える。ただし、 $M=10$, $m=-10$, ε は微小正数である。また、(15) 式は $\delta(t)x(t)$ という非線形項を含むので、これにも対処する。連続値補助変数 $z(t)$ を導入し、

$$z(t) = \delta(t)x(t) \quad (17)$$

と置換することにより、(15) 式は

$$x(t+1) = 1.6z(t) - 0.8x(t) + u(t) \quad (18)$$

と表現できる。元の非線形項は新たに導入された (17) 式に含まれるが、(17) 式は、前節の 2 番目の置換例を用いて、(19) 式の不等式群として記述する。

$$\begin{cases} z(t) \leq M\delta(t) \\ z(t) \geq m\delta(t) \\ z(t) \leq x(t) - m(1-\delta(t)) \\ z(t) \geq x(t) - M(1-\delta(t)) \end{cases} \quad (19)$$

さて、以上をまとめると (13) のシステム方程式は、線形等式表現である (18) 式と線形不等式表現である (16), (19) 式の組合せで記述できることになる。

3.3 MLD システムの一般形

MLD システムの一般的数式表現は次式のように与えられる。

$$\begin{cases} x(t+1) = A_t x(t) + B_{1t} u(t) \\ \quad \quad \quad + B_{2t} \delta(t) + B_{3t} z(t) \\ y(t) = C_t x(t) + D_{1t} u(t) \\ \quad \quad \quad + D_{2t} \delta(t) + D_{3t} z(t) \\ E_{2t} \delta(t) + E_{3t} z(t) \leq E_{1t} u(t) + E_{4t} x(t) + E_{5t} \end{cases} \quad (20)$$

(20) 式中、 $x(t), u(t), y(t)$ は通常の線形システムを記述する状態方程式と同様、状態、連続値入力、出力である。 $\delta(t)$ の要素は離散値入力の場合もあるし、離散値補助変数の場合もある。 $z(t)$ は連続値補助変数である。 $A_t, B_{it}, C_t, D_{it}, E_{it}$ ($i=1,2,\dots,5$) は適当な次数の行列であり、添え字 t は時変を意味しているが、以降の本稿では時不変の場合のみを扱う。結局 (20) 式は、通常の状態方程式表現に δ, z といった補助変数が加わり、さらに第 3 式の線形行列不等式が加わった表現方法となっている。ここで注意したいのは、第 3 式は補助変数としての δ, z を一意に決める不等式群であるということである。たとえば前節の例では、現在の入力 u 、現在の内部状態 x より (16), (19) 式から補助変数 δ, z が一意に決まり、その結果、(18) 式から 1 ステップ先の状態 $x(t+1)$ が一意に決まることになる。この一意性は、裏を返すと、 δ, z を一意に決めるのに必要なだけの不等式を集めなければならないことを意味している。後の計算負荷を少なくするためには、第 3 式をできるだけ簡潔な表現とすることが大切である。

3.4 表現可能なクラス例

3.4.1 離散値入力

前述のように、スイッチによる ON/OFF 制御や、モータのノッチ制御などは、離散値入力の代表例であるが、これらは MLD システムとして記述可能である。ここでは (21) 式のような、4 段階の離散値入力を持つシステムを考える。

$$\begin{cases} x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) \\ u(t) \in \{u_1, u_2, u_3, u_4\} \end{cases} \quad (21)$$

このような離散値入力を表現するために、0-1 変数 δ_1, δ_2 を新入力変数と見なし、

$$\begin{cases} [\delta_1 = 0, \delta_2 = 0] \leftrightarrow [z(t) = u_1] \\ [\delta_1 = 0, \delta_2 = 1] \leftrightarrow [z(t) = u_2] \\ [\delta_1 = 1, \delta_2 = 0] \leftrightarrow [z(t) = u_3] \\ [\delta_1 = 1, \delta_2 = 1] \leftrightarrow [z(t) = u_4] \end{cases} \quad (22)$$

と関連づける。 $z(t)$ は見掛け上連続な補助変数である。(22) 式の関連づけを、それと等価な線形不等式表現に置き換えることにより、(21) 式のシステムは

$$x(t+1) = Ax(t) + Bz(t)$$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} z(t) \leq \begin{bmatrix} u_4 - u_1 & u_4 - u_1 \\ 0 & 0 \\ u_4 - u_2 & u_2 - u_4 \\ u_2 - u_1 & u_1 - u_2 \\ u_3 - u_4 & u_4 - u_3 \\ u_1 - u_3 & u_3 - u_1 \\ 0 & 0 \\ u_1 - u_4 & u_1 - u_4 \end{bmatrix} \delta(t) + \begin{bmatrix} u_1 \\ -u_1 \\ u_4 \\ -u_1 \\ u_4 \\ -u_1 \\ u_4 \\ u_4 - 2u_1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

と記述される。ただし、

$$\delta(t) = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{bmatrix}$$

である。(23)式の第2式により、与えられた離散値入力 $\delta(t)$ から連続値補助変数 $z(t)$ が一意に定まり、第1式より状態 $x(t)$ が決まる。

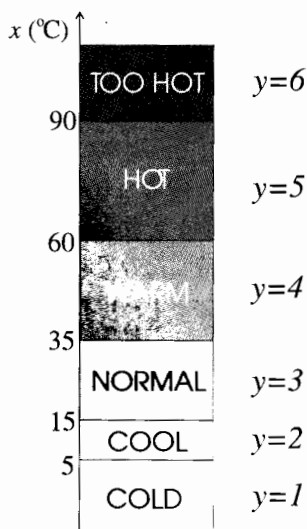
3.4.2 離散値 (定性値) 出力

離散値 (定性値) 的出力を持つシステムも同様に MLD システムとして記述可能である。たとえば、次のシステムを考える。

$$x(t+1) = ax(t) + bu(t)$$

$$Y(t) = \begin{cases} \text{COLD} & \text{if } x(t) \leq 5^\circ \\ \text{COOL} & \text{if } 5^\circ < x(t) \leq 15^\circ \\ \text{NORMAL} & \text{if } 15^\circ < x(t) \leq 35^\circ \\ \text{WARM} & \text{if } 35^\circ < x(t) \leq 60^\circ \\ \text{HOT} & \text{if } 60^\circ < x(t) \leq 90^\circ \\ \text{TOO HOT} & \text{if } 90^\circ < x(t) \end{cases} \quad (24)$$

この場合は、離散的出力を第1図に示すように連続変数としての通常出力 $y(t)$ に関連づける。この関連づけは、離散値補助変数 δ_i ($i=1, \dots, 6$) を導入することにより、次のように記述される。



第1図 離散値出力の例

$$\begin{cases} [\delta_1(t) = 1] \leftrightarrow [x(t) \leq 5] \\ [\delta_2(t) = 1] \leftrightarrow [x(t) \leq 15] \\ [\delta_3(t) = 1] \leftrightarrow [x(t) \leq 35] \\ [\delta_4(t) = 1] \leftrightarrow [x(t) \leq 60] \\ [\delta_5(t) = 1] \leftrightarrow [x(t) \leq 90] \\ \delta_6(t) = 1 \end{cases} \quad (25)$$

この際、補助変数間には次の関係が成り立たなければならない。

$$\begin{cases} [\delta_1(t) = 1] \rightarrow [\delta_2(t), \delta_3(t), \delta_4(t), \delta_5(t) = 1] \\ [\delta_2(t) = 1] \rightarrow [\delta_3(t), \delta_4(t), \delta_5(t) = 1] \\ [\delta_3(t) = 1] \rightarrow [\delta_4(t), \delta_5(t) = 1] \\ [\delta_4(t) = 1] \rightarrow [\delta_5(t) = 1] \end{cases} \quad (26)$$

このように定義された補助変数 δ を用いて、前述の出力 y は

$$y(t) \equiv 1\delta_1(t) + 2(\delta_2(t) - \delta_1(t)) + 3(\delta_3(t) - \delta_2(t)) + 4(\delta_4(t) - \delta_3(t)) + 5(\delta_5(t) - \delta_4(t)) + 6(\delta_6(t) - \delta_5(t)) \quad (27)$$

と記述でき、(20)式の一般形となる。

その他、先に例題として挙げた区分的線形系、双線形系、有限状態機械 (オートマトン) など、多岐にわたるクラスが MLD システムとして記述可能である。

4. MLD システムの制御方法

4.1 最適制御

本節では、MLD システムとして表現された制御対象に対する最適制御を考え、次節で扱う Receding horizon 法を導入したモデル予測制御適用のベースとする。MLD システムに対する最適制御問題は次のように記述される。

【問題1】

与えられた初期状態 x_0 と有限時間 T に対して、状態 x_0 を最終状態 x_f まで移行させ、かつ次の評価関数 J を最小化するような次の制御入力列 $u_0^{T-1} \triangleq \{u(0), u(1), \dots, u(T-1)\}$ を求めよ。

$$J(u_0^{T-1}, x_0) \triangleq \sum_{t=0}^{T-1} \left\{ \|u(t) - u_1\|_{Q_1}^2 + \|\delta(t, x_0, u_0^t) - \delta_1\|_{Q_2}^2 + \|z(t, x_0, u_0^t) - z_1\|_{Q_3}^2 + \|x(t, x_0, u_0^t) - x_1\|_{Q_4}^2 + \|y(t, x_0, u_0^t) - y_1\|_{Q_5}^2 \right\} \quad (28)$$

ただし、

$$x(T, x_0, u_0^{T-1}) = x_f \quad (29)$$

である。 $x(T, x_0, u_0^{T-1})$ は、時刻 $t=0$ における初期状態 x_0 に対し入力列 u_0^{T-1} が入力された結果、最終時刻 $t=T$ において実現される状態を表す。(28)式中の他の変数の表記も同様である。また、 $\|x\|_Q^2 \triangleq x'Qx$ とする。 $Q_i = Q_i' \geq 0$ ($i=1, 2, \dots, 5$) は与えられた重み行列である。 $x_1, u_1, \delta_1, z_1, y_1$ は、与えられたオフセットであり、通常

はそれぞれの最終値 $x_f, u_f, \delta_f, z_f, y_f$ を採用する。

問題 1 は最終的に混合整数 2 次計画問題 (Mixed Integer Quadratic Programming, MIQP) に帰着される。なぜなら、各時刻における $x(t)$ は一般に、

$$x(t) = A^t x_0 + \sum_{i=0}^{t-1} A^i [B_1 u(t-1-i) + B_2 \delta(t-1-i) + B_3 z(t-1-i)] \quad (30)$$

と記述でき、(30) 式と (20) 式の第 2 式を (20) 式の第 3 式と (28) 式に代入することにより、問題を

$$\begin{cases} \min_{\nu} \nu' S_1 \nu + 2(S_2 + x_0' S_3) \nu \\ \text{subj. to } F_1 \nu \leq F_2 + F_3 x_0 \end{cases} \quad (31)$$

と書き換えることが可能だからである。ただし、

$$\begin{aligned} \Omega &\triangleq \begin{bmatrix} u(0) \\ \vdots \\ u(T-1) \end{bmatrix}, \quad \Delta \triangleq \begin{bmatrix} \delta(0) \\ \vdots \\ \delta(T-1) \end{bmatrix}, \\ \Xi &\triangleq \begin{bmatrix} z(0) \\ \vdots \\ z(T-1) \end{bmatrix}, \quad \nu \triangleq \begin{bmatrix} \Omega \\ \Delta \\ \Xi \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (32)$$

と定義する。(31) 式は一般の 2 次計画問題そのものであるが、 δ つまり Δ が整数変数であるため、混合整数 2 次計画問題となる。混合整数 2 次計画問題はスケジューリング技術でも問題記述の基本形となっており、この辺は制御技術とスケジューリング技術の接点であるともいえる。混合整数 2 次計画問題の解法については、4.3 で言及する。

4.2 Receding horizon 制御

前節では、固定初期時刻 $t=0$ に内部状態 $x=x_0$ である対象に対して、固定時間 T 後までの挙動に関する最適制御を考えた。これに対して、最適化問題を解く区間 (horizon) をサンプリング周期ごとにシフトしながらオンライン最適化を繰り返すのが Receding horizon 制御である。すなわち、各サンプリング時刻 t から T ステップ先までの有限区間で同様な最適制御を考え、解として得られた最適入力系列のうち、現在時刻の最適入力のみを実際に使い、次のサンプリング時刻 $t+1$ に改めて T ステップ先までの同様な最適計算を行うことで制御し続ける、という考え方である。数式では以下のように表現される。Receding horizon 法における計算上の入力列を、実際に適用する入力 u と区別するため v と記述すると、各時刻における最適化問題は、

$$\begin{aligned} \min_{\{v_0^{T-1}\}} J(v_0^{T-1}, x(t)) &\triangleq \sum_{t=0}^{T-1} \left\{ \|v(t) - v_e\|_{Q_1}^2 \right. \\ &+ \|\delta(k|t) - \delta_e\|_{Q_2}^2 + \|z(k|t) - z_e\|_{Q_3}^2 \\ &\left. + \|x(k|t) - x_e\|_{Q_4}^2 + \|y(k|t) - y_e\|_{Q_5}^2 \right\} \quad (33) \end{aligned}$$

$$\text{subj. to } \begin{cases} x(T|t) = x_e \\ x(k+1|t) = Ax(k|t) + B_1 v(k) \\ \quad \quad \quad + B_2 \delta(k|t) + B_3 z(k|t) \\ y(k|t) = Cx(k|t) + D_1 v(k) + D_2 \delta(k|t) \\ \quad \quad \quad + D_3 z(k|t) \\ E_2 \delta(k|t) + E_3 z(k|t) \leq E_1 v(k) + E_4 x(k|t) \\ \quad \quad \quad + E_5 \end{cases} \quad (34)$$

と表現される。ここで、

$$\begin{aligned} Q_1 = Q_1' > 0, \quad Q_2 = Q_2' \geq 0, \quad Q_3 = Q_3' \geq 0, \\ Q_4 = Q_4' > 0, \quad Q_5 = Q_5' \geq 0 \end{aligned}$$

を前提とする。また、

$$x(k|t) \triangleq x(t+k, x(t), v_0^{k-1})$$

であり、これは該当時刻 t において計算された最適化入力列 v_0^{k-1} を入力した場合、時刻 $t=t+k$ で到達する状態を表す。 $\delta(k|t)$, $z(k|t)$, $y(k|t)$ も同様に定義される。 $x_e, u_e, \delta_e, z_e, y_e$ は (28) 式中の $x_1, u_1, \delta_1, z_1, y_1$ 同様、それぞれの最終値を表しているが、これらは (20) 式を満足し、かつ定常状態を前提としている点で異なる。すなわち、時不変のシステムであれば、

$$\begin{cases} x_e = Ax_e + B_1 u_e + B_2 \delta_e + B_3 z_e \\ y_e = Cx_e + D_1 u_e + D_2 \delta_e + D_3 z_e \\ E_2 \delta_e + E_3 z_e \leq E_1 u_e + E_4 x_e + E_5 \end{cases}$$

を満足する。ここは Receding horizon 法における安定性の議論と関わるが、詳細は参考文献 [1,2] を参照されたい。さて、(33), (34) 式の最適化問題の解 $\{v_t^*(k)\}_{k=0, \dots, T-1}$ が存在する場合、Receding horizon 法で実際に制御対象に入力するのは、先頭項である $v_t^*(0)$ のみで、

$$u(t) = v_t^*(0)$$

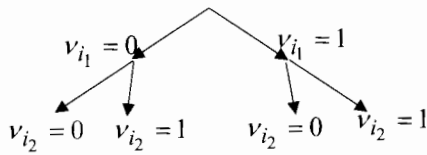
と定める。後続の $v_t^*(1), \dots, v_t^*(T-1)$ は捨てられて、次のサンプリング時刻において再び同様な最適化計算がなされる。各サンプリング時刻での最適化計算は前節の最適制御演算そのものであるから、問題は同様に混合整数 2 次計画問題に帰着される。従来の制約付きのモデル予測制御が 2 次計画問題に帰着されるのに対し、MLD システムの予測制御では 0-1 変数を含んでいるために混合整数 2 次計画問題に帰着したのであり、モデル予測制御の概念のハイブリッドシステムに対するきわめて自然な拡張であるといえよう。

4.3 分枝限定法

混合整数 2 次計画問題の代表的な解法は、通常の 2 次計画法をベースとした分枝限定法 (Branch and bound algorithm) である。ここでは、そのアルゴリズムを簡単に紹介する。分枝限定法とは、解空間上の部分空間を一括チェックし、該当空間内に解候補が存在し得るかどうかを事前に検証することで、不必要な探索手続きを

らかじめ排除するという考え方である。

説明のため、(31)式中の ν は $\nu = [\nu_{i_1}, \nu_{i_2}, \nu_{c_3}]'$ であるとし、 ν_{i_1}, ν_{i_2} は0-1変数、 ν_{c_3} は連続変数とする。最も簡単には、第2図の二分木で示される探索空間 ($\nu_{i_1} = 0/1, \nu_{i_2} = 0/1$ の4ケース) すべてについて、残る連続変数 ν_{c_3} に関する通常の2次計画問題を評価し、4ケース中の最適値を選択すれば最適解が得られたことになる。しかし、これでは整数変数が増えた場合に、2の階乗でケース分け(「分枝」)が増加してしまう。そこで、ケース分けを「限定」する工夫が必要である。たとえば、探索の過程で $\nu_{i_1} = 0$ の場合の部分空間が探索終了したとし、 $\nu_{i_1} = 0, \nu_{i_2} = 0$ の場合にある解候補が得られたとする。次に $\nu_{i_1} = 1$ の場合の部分空間を探索する場合に、 ν_{i_2} に関する「分枝」を行う前に ν_{i_2} を整数制約のない連続変数だとして通常の2次計画問題を解く。その結果が「解なし」あるいは得られた最適値が先の解候補より劣る場合は、もう「分枝」する必要がなくなる。なぜなら、 ν_{i_2} に整数制約を課せば、制約のない場合より結果が悪くなるのは自明だからである。もちろん、より良い解の存在可能性があれば、さらに下位の2分木探索へと再帰的に移行することになる。これにより、少ない計算回数で探索が終了する可能性が出てくる。0-1変数の数が増加した場合は、大幅な計算量の節約につながる。



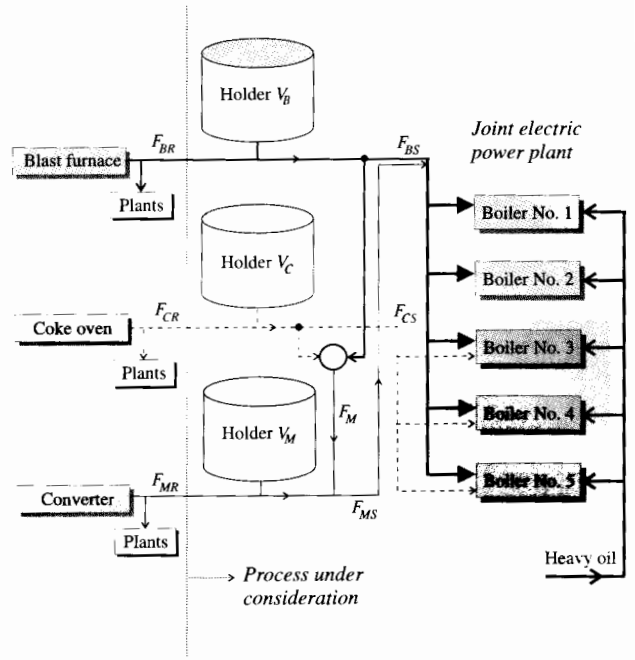
第2図 二分木による探索空間の例

5. 実プロセスへの適用シミュレーション

以上述べた理論的な枠組みの実プロセスへの適用事例として、製鉄所におけるガス供給システムの最適化問題[1.2]を説明する。本事例は、秋本らの報告[3]で取り上げられている問題をMLDシステムとして定式化し、本アプローチを適用するシミュレーションを行ったものである。

5.1 ガス供給システム

対象となるシステムを第3図に示す。製鉄所では、副生成物として、高炉ガス(Bガス)、コークス炉ガス(Cガス)および転炉ガスなどからなる混合ガス(Mガス)が生産される。これらのガスは所内で使用され、残りはガスホルダに蓄えられるほか、関連した火力発電設備においても使用される。火力発電設備の5基のボイラーでは主燃料としてBガスにMガスを混合した増熱Bガスが用いられる。助燃料として、No. 1, 2号機では重油が用いられるが、No. 3~5号機では重油かCガスのいずれかを用いればよい。コストの面からは、なるべく重油よりもCガスを使用したいが、そのために所内のガス需



第3図 ガス供給システム

給バランスを崩してはならない。本問題は、与えられたガス発生予定量、使用予定量、および種々の制約条件のもとで、目的関数を最大化するような火力発電設備に供給するガス量の系列を求めることである。

5.2 問題の定式化

モデルに用いる変数およびパラメータの物理的意味を第2表に示す。サンプリング周期を ΔT とし、サンプリング時刻間ではガス流量は一定であると仮定すると、各ガスホルダのガス量のダイナミクスは以下のように表される。

$$V_B(t+1) = V_B(t) + \Delta T [F_{BR}(t) - F_{BS}(t) - \alpha F_M(t)] \quad (35a)$$

$$V_C(t+1) = V_C(t) + \Delta T [F_{CR}(t) - F_{CS}(t) - (1-\alpha)F_M(t)] \quad (35b)$$

$$V_M(t+1) = V_M(t) + \Delta T [F_{MR}(t) - F_{MS}(t) + F_M(t)] \quad (35c)$$

F_{BR}, F_{CR}, F_{MR} は計画値として与えられるが、ガス供給システムにとっては既知の外乱となる。ここで、各ホルダの保有量には、以下のような上下限がある。

$$V_B^L \leq V_B(t) \leq V_B^U \quad (36a)$$

$$V_C^L \leq V_C(t) \leq V_C^U \quad (36b)$$

$$V_M^L \leq V_M(t) \leq V_M^U \quad (36c)$$

ボイラーの操業上の制約から、Bガス、Cガスの供給量には以下のような制約がある。

$$F_{BS}^L \leq F_{BS}(t) \leq F_{BS}^U \quad (37a)$$

$$F_{CS}^L \leq F_{CS}(t) \leq F_{CS}^U \quad (37b)$$

第2表 モデル中の記号の意味

記号	物理的意味	単位
F_{BR}, F_{CR}, F_{MR}	残ガス量	m^3/h
V_B, V_C, V_M	ガスホルダのガス保有量	m^3
F_M	Bガス, Cガスから生成されるMガス量	m^3/h
F_{BS}, F_{CS}, F_{MS}	火力発電設備に供給するガス量	m^3/h
r_1	ガスの評価金額	yen
r_2	ガス専焼による利益	yen/h
r_9	ガス専焼を継続できなかったことによる損失	yen
$r_{10} \sim r_{15}$	ホルダレベルの変動を抑制するペナルティ	yen/ m^3
r_{16}, r_{17}	ガス専焼ボイラー数が一度に複数減少したことによる損失	yen
α	BガスとCガスの混合比	
V_B^U, V_C^U, V_M^U	ガスホルダのガス保有量上限	m^3
V_B^L, V_C^L, V_M^L	ガスホルダのガス保有量下限	m^3
V_B^N, V_C^N, V_M^N	ガスホルダの標準レベル	m^3
$F_{BS}^U, F_{CS}^U, F_{MS}^U$	火力発電設備に供給するガス量上限	m^3/h
$F_{BS}^L, F_{CS}^L, F_{MS}^L$	火力発電設備に供給するガス量下限	m^3/h
q_{BI}^U, q_{BI}^L	増熱Bガスのカロリー上限, 下限	kcal/ m^3
F_{CS}^*	ガス専焼のための最低限のCガス量	m^3/h
q_B, q_C, q_M	ガスのカロリー量	kcal/ m^3
ΔT	サンプリング周期	h
T	予測区間の長さ	step

また,

$$F_{MS}(t) \geq 0 \quad (38a)$$

$$F_M(t) \geq 0 \quad (38b)$$

とする.

MガスとBガスを混合する前後の熱量バランスと, 増熱Bガスのカロリーに対する制約から,

$$(q_{BI}^L - q_B)F_{BS}(t) + (q_{BI}^L - q_M)F_{MS}(t) \leq 0 \quad (39a)$$

$$-(q_{BI}^U - q_B)F_{BS}(t) - (q_{BI}^U - q_M)F_{MS}(t) \leq 0 \quad (39b)$$

が成り立つ.

助燃料としてCガスだけを用いる(ガス専焼)のために必要な最低限のCガス量を F_{CS}^* , ガス専焼のボイラー数を $n(t)$ とする. $n(t)$ はなるべく大きくしたいので, 下記が成り立つ.

$$n(t) = 0 \text{ if } F_{CS}^L \leq F_{CS}(t) < F_{CS}^* \quad (40a)$$

$$n(t) = 1 \text{ if } F_{CS}^* \leq F_{CS}(t) < 2F_{CS}^* \quad (40b)$$

$$n(t) = 2 \text{ if } 2F_{CS}^* \leq F_{CS}(t) < 3F_{CS}^* \quad (40c)$$

$$n(t) = 3 \text{ if } 3F_{CS}^* \leq F_{CS}(t) < F_{CS}^U \quad (40d)$$

(40)式は, 0-1変数 $n_1(t)$, $n_2(t)$, $n_3(t)$ を用いて, 以下のように表せる.

$$[n_1(t) = 0] \leftrightarrow [F_{CS} \geq F_{CS}^*] \quad (41a)$$

$$[n_2(t) = 0] \leftrightarrow [F_{CS} \geq 2F_{CS}^*] \quad (41b)$$

$$[n_3(t) = 0] \leftrightarrow [F_{CS} \geq 3F_{CS}^*] \quad (41c)$$

$$[n_3(t) = 1] \rightarrow [n_1(t) = 1], [n_2(t) = 1] \quad (41d)$$

$$[n_2(t) = 1] \rightarrow [n_1(t) = 1] \quad (41e)$$

$$[n_1(t) = 0] \rightarrow [n_2(t) = 0], [n_3(t) = 0] \quad (41f)$$

$$[n_2(t) = 0] \rightarrow [n_3(t) = 0] \quad (41g)$$

また, 以下の不等式で表すこともできる.

$$F_{CS}(t) \geq F_{CS}^* + (F_{CS}^L - F_{CS}^*)[1 - n_1(t)] \quad (42a)$$

$$F_{CS}(t) \leq F_{CS}^* - \varepsilon + (F_{CS}^U - F_{CS}^* + \varepsilon)n_1(t) \quad (42b)$$

$$F_{CS}(t) \geq 2F_{CS}^* + (F_{CS}^L - 2F_{CS}^*)[1 - n_2(t)] \quad (42c)$$

$$F_{CS}(t) \leq 2F_{CS}^* - \varepsilon + (F_{CS}^U - 2F_{CS}^* + \varepsilon)n_2(t) \quad (42d)$$

$$F_{CS}(t) \geq 3F_{CS}^* + (F_{CS}^L - 3F_{CS}^*)[1 - n_3(t)] \quad (42e)$$

$$F_{CS}(t) \leq 3F_{CS}^* - \varepsilon + (F_{CS}^U - 3F_{CS}^* + \varepsilon)n_3(t) \quad (42f)$$

$$n_3(t) - n_1(t) \leq 0 \quad (42g)$$

$$n_3(t) - n_2(t) \leq 0 \quad (42h)$$

$$n_2(t) - n_1(t) \leq 0 \quad (42i)$$

$$n(t) = n_1(t) + n_2(t) + n_3(t) \quad (42j)$$

ここで、 ε は十分小さな正の定数である。

さらに、C ガスと重油の頻繁な切換えを防ぐため、以下の制約を設ける。

- (1) ガス専焼は、少なくとも $2\Delta T$ 時間継続する。
- (2) ガス専焼ボイラーの数を減少させるときは 1 基ずつ行う。

上記の制約を表すため、 $n(t)$ の時間変化を表す変数 $\Delta n^+(t)$ 、 $\Delta n^-(t)$ を導入する。

$$n(t) - n(t-1) = \Delta n^-(t) - \Delta n^+(t) \quad (43a)$$

$$\Delta n^+(t), \Delta n^-(t) \geq 0 \quad (43b)$$

$\Delta n^-(t)$ は $n(t)$ の減少を表しており、0-1 変数 $k_1(t)$ 、 $k_2(t)$ 、 $k_3(t)$ を用いて以下のように表す。

$$\Delta n^-(t) = k_1(t) + k_2(t) + k_3(t) \quad (44a)$$

$$k_1(t) \geq k_2(t) \quad (44b)$$

$$k_1(t) \geq k_3(t) \quad (44c)$$

$$k_2(t) \geq k_3(t) \quad (44d)$$

$$\Delta n^-(t) = 3[1 - k_1(t)] \quad (44e)$$

(2) の制約を表すため、次のようなペナルティ項 $s(t)$ を導入する。

$$s(t) = \begin{cases} \Delta n^-(t) & \text{if } \Delta n^+(t-1) > 0 \\ 0 & \text{if } \Delta n^+(t-1) = 0 \end{cases} \quad (45)$$

また、 $\gamma(t)$ を $[\gamma(t) = 1] \leftrightarrow [n(t-1) > n(t-2)]$ を満たす 0-1 変数とすれば、次式が成り立つ。

$$-n(t-1) + n(t-2) \geq \frac{7}{2} - 4\gamma(t) \quad (46a)$$

$$n(t-1) + n(t-2) \geq 4\gamma(t) \quad (46b)$$

$$s(t) \geq 0 \quad (46c)$$

$$s(t) \leq 3\gamma(t) \quad (46d)$$

$$s(t) \leq k_1(t) + k_2(t) + k_3(t) \quad (46e)$$

$$s(t) \geq k_1(t) + k_2(t) + k_3(t) - 3[1 - \gamma(t)] \quad (46f)$$

さて、最大化すべき目的関数を次のように与える [3]。

$$p(t) = r_1 \Delta T [q_B F_{BS}(t) + q_C [F_{CS}(t) - F_{CS}^* n(t)] + q_M F_{MS}(t)] + r_2 \Delta T n(t) \quad (47)$$

これは、以下で定義されるスラック変数 $w(t)$ を最小化することで達成される。 $p_e(t)$ は目的関数の最終値である。

$$p(t) \geq p_e(t) - w(t) \quad (48a)$$

$$w(t) \geq 0 \quad (48b)$$

以上の (35)~(48) 式、および変数

$$x(t) = [V_B(t) \ V_C(t) \ V_M(t) \ n(t-1) \ n(t-2)]' \quad (49a)$$

$$u(t) = [F_{BS}(t) - F_{BR}(t) \ F_{CS}(t) - F_{CR}(t) \ F_{MS}(t) - F_{MR}(t) \ F_M(t)]' \quad (49b)$$

$$\delta(t) = [n_1(t) \ n_2(t) \ n_3(t) \ \gamma(t) \ k_1(t) \ k_2(t) \ k_3(t)]' \quad (49c)$$

$$z(t) = [s(t) \ w(t)]' \quad (49d)$$

によって、このガス供給システムは MLD システムとして表現される。

5.3 Receding horizon 制御の適用

実操業において、オペレータは各ホルダのガス量をできるだけ標準レベルに保とうとする。そこで、この標準レベルを設定値とし、 V_B^N 、 V_C^N 、 V_M^N で表す。

本稿で述べている MLD システムの予測制御では、定常状態の存在が必要である。そこで、 $k \geq T$ においては $F_{BR}(k|t) = F_{BR}(T|t)$ が成り立つと仮定する。 $F_{CR}(t)$ 、 $F_{MR}(t)$ についても同様である。定常状態における各変数の値を添え字 e によって表す。定常状態において、(49) 式は、

$$x_e(t) = [V_B^N \ V_C^N \ V_M^N \ n_{e,t}(t) \ n_{e,t}(t)]' \quad (50a)$$

$$u_e(t) = [0 \ 0 \ 0 \ 0]' \quad (50b)$$

$$\delta_e(t) = [n_{1,e}(t) \ n_{2,e}(t) \ n_{3,e}(t) \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]' \quad (50c)$$

$$z_e(t) = [0 \ 0]' \quad (50d)$$

となる。また、目的関数の定常状態での値は (48a) 式の $p_e(t)$ である。

このガス供給システムに 4.2 で述べた Receding horizon 制御を適用する。ここでは、(47) 式の目的関数を考慮するため、(33) 式の 2 次評価関数に線形項 $Q_p w(k|t)$ を付加する。サンプリング周期 $\Delta T = 2$ 、予測区間 $T = 4$ とし、

$$Q_p = 50$$

$$Q_1 = \text{diag}(10^{-2}, 10^{-1}, 10^{-1}, 10^2)$$

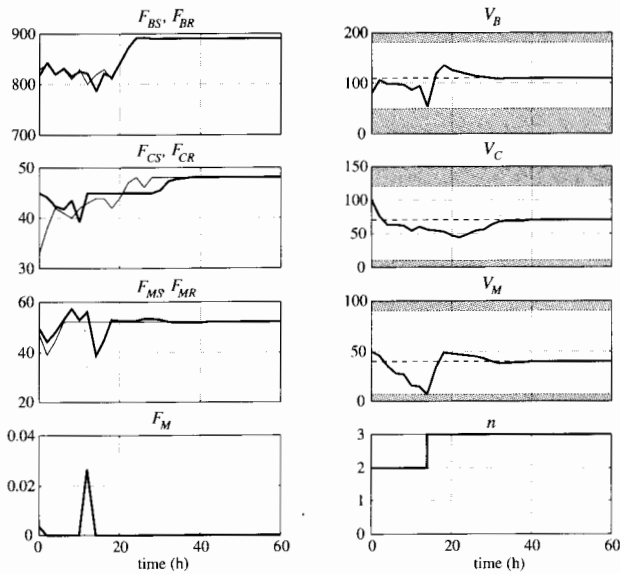
$$Q_2 = \text{diag}(10^{-2}, 10^{-2}, 10^{-2}, 10^{-2}, Q_p r_{16}, Q_p r_{17})$$

$$Q_3 = \text{diag}(r_9, 10^{-3})$$

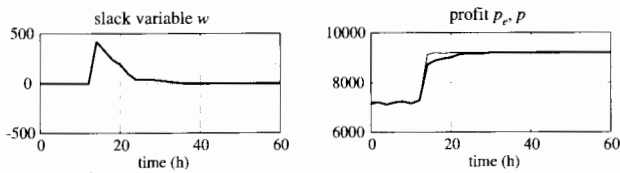
$$Q_4 = \text{diag}((r_{10} + r_{11})/2, (r_{12} + r_{13})/2, (r_{14} + r_{15})/2, 10^{-4}, 10^{-4})$$

とする。シミュレーション結果を第 4, 5 図に示す。漸近的な安定性を示すために残ガス量は途中から一定値となるように設定しているが、火力発電設備へのガス供給量も残ガス量と同じ値に収束しており、各ホルダのガス量も設定値に収束している。ガス専焼のボイラー数は、途中で 2 基から 3 基に増加しており、それとともに目的関数の値も大きくなっている。

スラック変数 $w(t)$ に関する制約 (48b) 式を緩和することによって、操作量を大きく変更することも可能であ



第4図 シミュレーション結果(1)
 太線： F_{BS} , F_{CS} , F_{MS} , F_M , V_B , V_C , V_M , n
 細線： F_{BR} , F_{CR} , F_{MR}
 点線： V_B^N , V_C^N , V_M^N

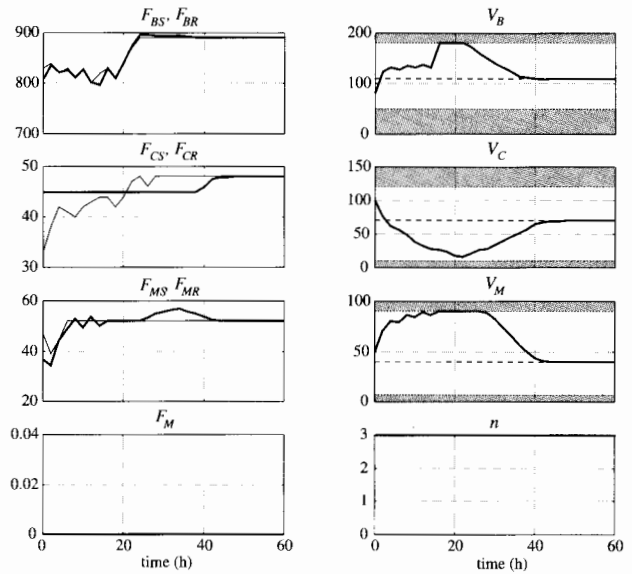


第5図 シミュレーション結果(2)
 スラック変数 $w(t)$, 目的関数 $p(t)$ (太線), $p_e(t)$ (細線)

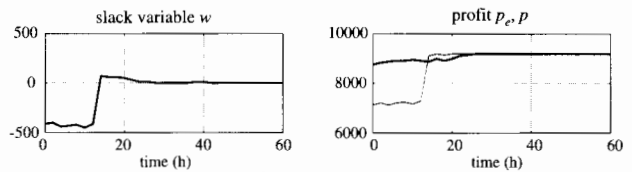
る. $w(k|t) \geq 0$ が $k \geq T-t+t_s$ においてのみ成り立つと仮定し, $t_s=12$ とする. この場合のシミュレーション結果を第6, 7図に示す. ガス専焼ボイラー数は当初から3基となっており, 目的関数の値も高いレベルに保たれている. ただし, 各ホルダのガス量は上下限值にはあるが, 大きく変動している.

本シミュレーションでは, 連続変数25個, 整数変数28個, 線形制約条件121個を含む混合整数計画問題を各ステップで解く必要がある. $t=0$ における計算時間は, SPARCStation 4 および参考文献 [4] のパッケージソフトを用いて1.2秒であった. 本問題の場合, サンプルング周期は2時間であり, 計算時間の問題はない.

本事例の制御対象は, ダイナミクスにルールや制約条件が複合したハイブリッドシステムの典型例である. 実は, 前節で述べた定式化は, 秋本ら [3] のものと大きく変わるところはなく, 秋本らの報告はMLDシステムに関する先駆的な業績であるといえる. 秋本らの方法と本アプローチの違いは, 本問題を前向き最適化問題としてとらえるか, フィードバック制御としての安定性の議論が必要な予測制御の問題としてとらえるかの視点の差にあり, それが最適化問題の評価関数の違いなどに現れ



第6図 スラック変数の制約を緩和した場合のシミュレーション結果(1)
 太線： F_{BS} , F_{CS} , F_{MS} , F_M , V_B , V_C , V_M , n
 細線： F_{BR} , F_{CR} , F_{MR}
 点線： V_B^N , V_C^N , V_M^N



第7図 スラック変数の制約を緩和した場合のシミュレーション結果(2)
 スラック変数 $w(t)$, 目的関数 $p(t)$ (太線), $p_e(t)$ (細線)

ているものと考えられる.

6. おわりに

本稿では, 離散的な事象と連続的なダイナミクスが混在するハイブリッドシステムを記述する新しい枠組みとして, MLD (Mixed Logical Dynamical) システムについて述べ, その制御方法として, モデル予測制御の基本的な考え方である Receding horizon 法を適用し, 混合整数計画問題に帰着させるアプローチについて解説した. また, その適用例として, 製鉄所におけるガス供給システムをMLDシステムとして定式化し, 上記のアプローチを適用したシミュレーション結果を示した.

文中ではふれることができなかったが, MLDシステムを用いた故障診断の研究 [5], さらに故障発生時に制御系を自動的に再構成する研究 [6] も行われている. 故障の有無を0-1変数として表すことにより, 故障という離散的な事象を巧妙にモデル化しており, MLDシステムの応用範囲の広さを示すものとして注目される.

プロセス制御技術者にとってもなじみの深いモデル予測制御の拡張であるという点からも, 本アプローチがハ

イブリッドシステムの制御におけるもっとも実用的で強力なツールの一つであることは間違いない。計算機能力の向上や解法的高速化とともに、リアルタイムの最適化に基づく制御が可能な範囲はますます拡大していくと予想され、プロセス制御の幅を拓げるものとして本アプローチに対する期待は大きい。実プロセスへの適用例が早く現れることを期待したい。

本稿を執筆するにあたり、貴重なご意見をいただきました。参考文献[3]の執筆者である秋本圭一氏(元川崎製鉄、現四国職業能力開発大学校)に感謝いたします。

(2001年11月6日受付)

参考文献

- [1] A. Bemporad and M. Morari: Control of systems integrating logic, dynamics and constraints; *Automatica*, Vol. 35, pp. 407-427 (1999)
- [2] A. Bemporad and M. Morari: Control of systems integrating logic, dynamics and constraints; *Technical Report AUT-98-04, Institut für Automatik, ETH - Swiss Federal Institute of Technology* (1998)
- [3] K. Akimoto, N. Sannomiya, Y. Nishikawa and T. Tsuda: An optimal gas supply for a power plant using a mixed integer programming model; *Automatica*, Vol. 27, No. 3, pp. 513-518 (1991)
- [4] R. Fletcher and S. Leyffer: A mixed integer quadratic programming package; *Technical report, University of Dundee* (1994)
- [5] A. Bemporad, D. Mignone and M. Morari: Moving horizon estimation for hybrid systems and fault detection; *Proceeding of the American Control Conference*, pp. 2471-2475 (1999)
- [6] K. Tsuda, D. Mignone, G. Ferrari-Trecate and M. Morari: Reconfiguration strategies for hybrid systems; *Proceeding of the American Control Conference*, pp. 868-873 (2001)

著者略歴

あさの 一哉



1981年東京大学工学部計数工学科卒業、1983年同大学院工学系研究科修士課程(計数工学)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。現在、技術研究所加工・制御研究部門主任研究員。その間、1993~1994年 California Institute of Technology, 1994~1995年 Swiss Federal Institute of Technology (ETH) 客員研究員。博士(工学)。1995年計測自動制御学会技術賞・友田賞, 2000年同論文賞受賞。計測自動制御学会, 電気学会などの会員。

つだ 和 昌



1988年東京大学工学部計数工学科卒業、1990年同大学院工学系研究科修士課程(計数工学)修了。同年日本鋼管(株)入社。鉄鋼プロセスおよび重工プロセス制御の研究開発に従事。現在、基盤技術研究所計測制御研究部主任研究員。この間、1998~2000年 Swiss Federal Institute of Technology (ETH) 客員研究員。計測自動制御学会, 日本鉄鋼協会の会員。

Alberto BEMPORAD



Alberto Bemporad received the master degree in Electrical Engineering in 1993 and the Ph.D. in Control Engineering in 1997 from the University of Florence, Italy. He spent the academic year 1996/97 at the Center for Robotics and Automation, Dept. Systems Science & Mathematics, Washington University, St. Louis, as a visiting researcher. In 1997-1999, he held a postdoctoral position at the Automatic Control Lab, ETH, Zürich, Switzerland, where he is currently affiliated as a senior researcher. Since 1999, he is assistant professor at the University of Siena, Italy. He received the IEEE Center and South Italy section "G. Barzilai" and the AEI (Italian Electrical Association) "R. Mariani" awards. He has published papers in the area of hybrid systems, model predictive control, computational geometry, and robotics. He is involved in the development of the Model Predictive Control Toolbox for Matlab. Since 2001, he is an Associate Editor of the IEEE Transactions on Automatic Control.

Manfred MORARI



In 1994 Manfred Morari was appointed head of the Automatic Control Laboratory at the Swiss Federal Institute of Technology (ETH) in Zürich. Before that he was the McCollum-Corcoran Professor and Executive Officer for Control and Dynamical Systems at the California Institute of Technology. He obtained the diploma from ETH Zürich and the Ph.D. from the University of Minnesota. His interests are in hybrid systems and the control of biomedical systems. In recognition of his research he received numerous awards, among them the Eckman Award of the AACC, the Colburn Award and the Professional Progress Award of the AIChE and was elected to the National Academy of Engineering (U.S.). Professor Morari has held appointments with Exxon R & E and ICI and has consulted internationally for a number of major corporations.