シミュレータを用いた複雑システムのモデリング*
(高炉の場合)佐々木 強^{*1}, 津村 幸治^{*2}Simulator-Based Modeling for Complex Systems
(Case of Blast Furnace)

Tsuyoshi SASAKI and Kouji TSUMURA

In this paper, we propose a method to give models of complex systems for controller design by using numerical simulators. We apply this method to a two-dimensional region simulator for blast furnace and show a process of leading a model for control. Furthermore we compare the dynamics of the model with the simulator and analyze the performance of this method.

Key Words: Modelling, Identification, Process Control, Complex System, Blast Furnace

1. はじめに

鉄高炉に代表される大規模で複雑なプロセスに対して制御系設計を行うには多くの困難を伴う。一つの理由は、そのプロセスにおける化学反応や輸送現象等の、信頼できる基礎方程式群をすべて導出することに知識と時間を要するということ⁽¹⁾、二つ目の理由は、たとえば基礎方程式群(物理モデル)が得られたとしても、多くの場合それらは多数の偏微分方程式、非線形方程式を含み、そのような方程式群で記述されるシステムに対する、制御器設計法が確立されていないということである。しかしその一方で、化学反応や輸送現象に関する基礎研究は各分野の研究者によって進められ、また最近の計算機パワーの増大を背景に、それらの基礎方程式を複雑に組み合わせたシミュレータが作成され、その有効性が確認されてきている⁽²⁾。

このような高炉の状況を一般的な制御系設計の手順:

- 1: 制御対象のモデリング, 基礎方程式群からなる物理モデルを導出する。
- 2: 物理モデルから制御系設計手法で扱える制御モデルを導出する。
- 3: 制御モデルを用いて補償器を設計する。

に照らして考えると、制御系設計手順の第1ステップは今後解決される、もしくは制御系設計手法における近年のロバスト制御理論の発展により、実システムと

物理モデルの間のある程度の誤差は、コントローラにより吸収できる可能性があるが、第2ステップが未解決問題として全体のボトルネックとなってきたといえる。そして第2ステップは更に次の2つの過程に分解できる。

2-1: 定常状態近傍の制御モデルを導出する。

2-2: 大域的制御モデルを導出する。

比較的モデル化が容易なシステムであれば、過程2-1を経て過程2-2が問題の本質となることが多い。しかしながら高炉のような分布定数系に代表されるシステムにおいては、過程2-1の解決さえ困難である場合がある。

以上を踏まえて本研究では、高炉の場合を例にとり、実システムを再現するシミュレータが存在することを前提にして、そのようなシミュレータから制御器設計のためのモデル(以後、制御モデルと呼ぶ)を導出する、つまり前述の過程2-1を解決する一手法を提案する。キーポイントとなるのは、シミュレータのデータから、注目する入出力特性を表す制御モデルを、なるべく元の物理モデルの各内部変数の物理的意味を損なわず同定するということである。これを実現するためには、後述するように多入出力系の同定手法が不可欠であるが、本論文では近年になってシステム同定の分野で注目されてきている、部分空間同定法を用いることを考える。

2. 高炉内プロセスの概要

高炉は鉄鉱石を溶融、還元して銑鉄を生産するプロ

* 原稿受付 1998年4月2日。

*¹ 千葉大学大学院(☎ 263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)。

*² 正員, 東京大学大学院工学系研究科(☎ 113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)。

E-mail: tsumura@crux.t.u-tokyo.ac.jp

セスである。図1に示すように、炉の登頂部から原材料となる鉄鉱石とコークスを交互に装入し、下部から高温の空気を吹き込ませ、コークスを燃焼させることによって生じる高温の一酸化炭素によって鉄鉱石を還元し、熔融状態の銑鉄を作り出す。還元、熔融され炉内にたまった銑鉄は最下層より取り出される。このプロセスのなかで注目すべきところは、融着帯と呼ばれる層の存在である⁽³⁾。融着帯は、鉄鉱石が溶解し、固体と液体の中間状態となっている層であり通気抵抗が大きく、生産性に対する影響が大である。そのため、現場の操業者が制御をおこなう際、融着帯の位置や形状を重要視し、これを望みのものにすることを目指している⁽³⁾。このことから高炉の制御モデル導出のためのキーポイントは、操作量と融着帯の位置・形状の関係の把握にあるといえる。本稿でも上記入出力関係に注目し、制御モデルを導出することを考える。

Fig. 1 Diagram of dynamic model for blast furnace

3. 2相4成分モデルとシミュレータ

本論文では高炉内の主反応（鉄鉱石から鉄への還元反応）をベースとした、次の2相4成分モデル⁽⁴⁾を与えられた物理モデルとして考える。もしこれに対して妥当な制御モデル導出手法が確立されるならば、同じ手法を実際の高炉の精密モデルおよびシミュレータに適用することにより、同様に妥当な制御モデルが導出されることが期待される。以下本章では、2相4成分モデルの特徴および偏微分方程式を示す。

高炉内の主な反応は次である。

これは Fe_2O_3 （酸化鉄：鉄鉱石の主成分）と CO （一酸化炭素）が反応し、 Fe （鉄）と CO_2 （二酸化炭素）が生成される還元反応である。反応式(1)は高炉の最も重要なものであり、ここではこの反応だけが存在するモデルを作成する。また反応式(1)では固体、液体、気体の三相が存在するが、モデルを簡単にするため、固体、

液体を合わせて以下のように一つの相とし、全体で2相4成分のモデルとする。

- 固体、液体： $\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{Fe} \rightarrow S$ 相
- 気体： $\text{CO}, \text{CO}_2 \rightarrow G$ 相

次は2相4成分モデルで用いる記号と変数の一覧である。

- S 相：成分 S_1 （鉄鉱石に対応）、 S_2 （鉄に対応）
- G 相：成分 G_1 （一酸化炭素に対応）、 G_2 （二酸化炭素に対応）
- 反応式： $a_0 S_1 + a_1 G_1 \rightarrow b_0 S_2 + b_1 G_2 + H$
- 反応係数： a_0, a_1, b_0, b_1
- 反応熱： H
- 反応熱分配効率： S 相 η_S, G 相 $\eta_G, (\eta_S + \eta_G = 1)$
- 反応速度： R (S 相温度の関数とする)
- 成分 S_1 の密度： d_{S1}
- 成分 S_2 の密度： d_{S2}
- 成分 S_1 の体積分率： α_{S1}
- 成分 S_2 の体積分率： $\alpha_{S2} (= 1 - \alpha_{S1})$
- 成分 G_1 の密度： β_{G1}
- 成分 G_2 の密度： β_{G2}
- S 相の密度 $\rho_S := d_{S1}\alpha_{S1} + d_{S2}\alpha_{S2}$
- G 相の密度 $\beta_G := \beta_{G1} + \beta_{G2}$
- S 相の速度ベクトル： $\mathbf{v}_S = (v_{Sx}, v_{Sy})^T$
- G 相の速度ベクトル： $\mathbf{v}_G = (v_{Gx}, v_{Gy})^T$
- S 相の温度： T_S
- G 相の温度： T_G
- C_S ： S 相の比熱
- k_S ： S 相の熱拡散係数
- U_{GS} ：相 G から相 S への熱移動係数
- C_G ： G 相の比熱
- k_G ： G 相の熱拡散係数
- U_{SG} ：相 S から相 G への熱移動係数
- 成分 G_1 の拡散係数： k_{Gd1}
- 成分 G_2 の拡散係数： k_{Gd2}

一般的な輸送を伴う化学反応プロセスを数式モデルを用いて解析する場合、物質収支、熱収支、運動量収支に基づく基礎方程式を解くことにより、反応炉内における質量、濃度分布、温度分布、流動状況がわかる。ただし計算コストの軽減のため、なんらかの仮定のもとにモデル化して解くことが多い。こうした点を考慮して、 S 相、 G 相それぞれの現象を表す基礎分方程式を次に与える。

3.1 S 相について

物質収支

固体粒子層を連続体とみなし、微小体積素片に出入りする固体粒子層の体積に関する収支関係を考えると

次の基礎方程式となる。

$$\frac{\partial(d_{S1}\alpha_{S1})}{\partial t} + \text{div}(d_{S1}\alpha_{S1}\mathbf{v}_S) + (a_0R) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(d_{S2}\alpha_{S2})}{\partial t} + \text{div}(d_{S2}\alpha_{S2}\mathbf{v}_S) - (b_0R) = 0 \quad (3)$$

熱収支

同様に S 相の熱収支に関する基礎方程式は、次のように与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_S C_S T_S)}{\partial t} + \text{div}(\rho_S C_S T_S \mathbf{v}_S) - (RH\eta_S) \\ = \text{div}(k_S \text{grad}(T_S)) + U_{GS}(T_G - T_S) \end{aligned} \quad (4)$$

運動量収支

S 相は高炉の固体相を模しているものである。そこで粒状の固体相流れのモデルとして有効である次の kinematic model⁽²⁾ を導入する。kinematic model は、図 2 に示すように、ある領域内に粒状の塊が充填されている状態から、重力により下方部の穴から塊が排出される状況を示したモデルであり、本稿ではこの流れを仮定する。このモデルは式 (5) で与えられる。

$$v_{Sx} = -B \frac{\partial v_{Sy}}{\partial x} \quad (5)$$

(ただし B は粒子径に比例する定数)

Fig. 2 Schematic diagram of kinematic model

3.2 G 相について

物質収支

基本的には S 相と同じであるが、 G 相は気体を想定しているため、濃度勾配による拡散を考慮する必要がある、次を得る。

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\beta_{G1})}{\partial t} + \text{div}(\beta_{G1}\mathbf{v}_G) \\ + \text{div}(k_{Gd1} \text{grad}(\beta_{G1})) + (a_1R) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\beta_{G2})}{\partial t} + \text{div}(\beta_{G2}\mathbf{v}_G) \\ + \text{div}(k_{Gd2} \text{grad}(\beta_{G2})) - (b_1R) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

熱収支

S 相の場合と同様の考えで基礎方程式を与える。

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\beta_G C_G T_G)}{\partial t} + \text{div}(\beta_G C_G T_G \mathbf{v}_G) - (RH\eta_G) \\ = \text{div}(k_G \text{grad}(T_G)) + U_{SG}(T_S - T_G) \end{aligned} \quad (8)$$

運動量収支

鉄鉱石、コークスが固体状態で充填されている層の中の気体の動きを、充填層内のマクロな流れを表現するエルガン式⁽²⁾に従い簡略化をおこなう。エルガン式は次のように表せる。

$$\frac{\partial \mathbf{v}_G}{\partial t} = -\text{grad}(P) - (f_1 + f_2|\mathbf{v}_G|) \quad (9)$$

ただし変数 f_1, f_2 は次に定義される。

$$f_1 := \frac{\hat{f}_1}{\beta_{G1} + \beta_{G2}}, \quad f_2 := -\frac{\hat{f}_2}{\beta_{G1} + \beta_{G2}} \quad (10)$$

(ここで $\hat{f}_1, \hat{f}_2$ は定数)

f_1, f_2 は通気抵抗の度合を示す値である。また P は圧力を表し、次の状態方程式で与えられる。

$$P = K(\beta_{G1} + \beta_{G2})T_G \quad (K \text{ は定数}) \quad (11)$$

3.3 計算領域

計算領域は図 3、図 4 に示すものであり、 S 相と G 相の二つの二次元領域に分けて考える。これは、 S 相成分の間を G 相成分が一様に通る抜けることができるという仮定をもとにしている。ただし G 相の流れは S 相の成分 S_1 の体積分率に応じた通気抵抗を受けるとする。 S 相に関しては図 3 に示すように塔頂部から S_1 成分を流入させる。また底部に設けた穴より S 相成分を流出させる。 G 相に関しては図 4 に示すように羽口を模した左壁面下の穴から成分 G_1 を流入させる。また塔頂部より G 相成分を排出する。

Fig. 3 Computational region for phase S

3.4 融着帯の表現

融着帯は鉄鉱石が固体と液体の中間状態にある層であり通気抵抗が高い。本モデルでは、この融着帯を成分 S_1 の体積分率が 50 ~ 70% の領域に相当するとし、この領域の通気抵抗を高くすることで融着帯を表現する。つまりその層でエルガン式 (9) の $\hat{f}_1, \hat{f}_2$ に大きな値を与える。

Fig. 4 Computational region for phase G

3.5 シミュレータから得られる結果

数値シミュレータは、偏微分方程式を差分近似し逐次解を求め、時間発展させていくことで実現する⁽⁵⁾。なお2相4成分モデルにおいては各変数、係数は無次元であり、その相対的振るまいのみ系のダイナミクスとしての意味をもつ。よって各変数に対して物理的単位を考慮せず、シミュレーションをおこなう。一例として図5において、定常状態 (State I: 羽口温度 = 1.5) から境界条件を変えて別の定常状態 (State II: 羽口温度 = 1.6) に移るまでの数値実験例を示しておく。図5は、3.3節で説明した計算領域における、State I, State II の高炉内の S 相速度ベクトル場 (各矢印、その長さが速度の相対的大きさを表す) と融着帯 (灰色の領域) を示している。なお、x 軸、y 軸の目盛は計算格子のインデックスを表している。この結果から、羽口の温度を上げることで融着帯の位置が上方に移動すること、S 相流れは、ほとんど変化しないことがわかる。この他の状態変数についてもシミュレータより得ることが可能である。

Fig. 5 Steady states of 2 phases & 4 ingredients model (State I: $T_G = 1.5$ at tuyere, State II: $T_G = 1.6$ at tuyere, gray area: cohesive zone ($S_1 = 0.5 \sim 0.7$), vectors: flows of phase S, scales of x-axis and y-axis: indices of grids)

4. 制御モデルの導出

融着帯の特徴は次である。

- 通気抵抗が大きい部分であり、ガス相の流れがその形状に大きく依存する。
- 還元、伝熱など高炉の主要な反応がこの融着帯を中心に進行する。

よってその位置・形状を制御することが、高炉制御におけるキーポイントであるといえる。本章では最終的な目標を融着帯の位置・形状制御におき、そのためには、どのような内部変数を操作しなければならないかを、元の物理モデルの構造から調べあげる。そして制御入力からそれら内部変数までの伝達関数の同定法について説明する。

4.1 融着帯と S 相物質収支式

2相4成分モデルにおいて融着帯は、成分 S_1 の体積分率 (50 ~ 70%) によって表現されている。よって融着帯とシミュレータの関係をみるためには S 相の物質収支式 (2) に注目する必要がある。しかしながら非線形偏微分方程式である式 (2) を、直接制御対象として扱うことは容易ではない。そこで、まず特性曲線法⁽⁶⁾を式 (2) に適用し、特性曲線上で非線形偏微分方程式を線形常微分方程式に変換することを考える。

4.2 S 相物質収支式と特性曲線法

説明を明確にするため、S 相物質収支式である式 (2) を、次の 2 次元の一般的な物質収支式で表現する。

$$\alpha_t + u\alpha_x + v\alpha_y + R(T_S(x, y)) = 0 \quad (12)$$

α は体積分率、 u, v は、それぞれ x, y 方向の S 相の速度成分、 R は化学反応速度で T_S の関数、 T_S は S 相温度である。また下添字 t, x, y は、それぞれの変数による偏微分を意味する (例えば $u_t = \partial u / \partial t$ である)。ここで変数 s (s は特性曲線のパラメータ) を導入し、変数 x, y, t を次のようにパラメトライズする。

$$\begin{aligned} x &= X(s) \\ y &= Y(s) \\ t &= T(s) \end{aligned} \quad (13)$$

このとき $\alpha(x, y, t)$ も、

$$\alpha(X(s), Y(s), T(s)) =: A(s) \quad (14)$$

とパラメトライズされる。ここで一つの特性曲線を、

$$\begin{aligned} \frac{d}{ds} X(s) &= u(X(s), Y(s)) \\ \frac{d}{ds} Y(s) &= v(X(s), Y(s)) \\ \frac{d}{ds} T(s) &= 1 \end{aligned} \quad (15)$$

と選ぶ。この特性曲線は、固体相流れの一つの流線に相当する。式(14)を s で微分すると、式(12)は特性曲線上で次となる。

$$\begin{aligned}\frac{d}{ds}A(s) &= \alpha_x \frac{d}{ds}X(s) + \alpha_y \frac{d}{ds}Y(s) + \alpha_t \frac{d}{ds}T(s) \\ &= \alpha_t + u\alpha_x + v\alpha_y \\ &= R(T_S) - \{u_x(X,Y) + v_y(X,Y)\}A(s)\end{aligned}\quad (16)$$

次に、 S 相速度の時間に対する変化が S 相体積分率の変化に比べ小さいと仮定する(高炉内現象を考えると、この仮定は妥当である)、このとき式(16)は s に関する線形常微分方程式とみることができる。その一般解は、

$$A(s) = e^{-D} \times \left\{ C + \int e^D R(T_S) ds \right\} \quad (17)$$

となる。ただし、

$$\begin{aligned}C &: \text{積分定数} \\ D &= \int (u_x + v_y) ds.\end{aligned}\quad (18)$$

この解に、初期条件、境界条件を与えることにより、 S 相の特性曲線(ここでは流線)上の一点の体積分率が求まる。

式(17)に注目すると、特性曲線上における $R(T_S)$ と D の積分によって体積分率が決定することがわかる。ここで D は S 相速度の関数であり、仮定を考慮すると短い時間の間では定数とみなされる。つまり式(17)において、比較的短い時間においては $R(T_S)$ だけが操作することができる変数となる。よって R の分布を操作することが、 S_1 の体積分率、すなわち融着帯を制御するのに有効であることがわかる。ところで $R(T_S)$ は S 相温度の関数である。そこで次に S 相温度 T_S について考える。

4.3 S 相熱収支式

(4) 式の S 相熱収支式の一般形である次式を考える。

$$\begin{aligned}\frac{\partial T_S}{\partial t} + \text{div}(T_S \mathbf{v}) \\ + R(T_S) + \text{div}(\text{grad}(T_S)) + T_S = T_G\end{aligned}\quad (19)$$

ここで T_S, T_G はそれぞれ S 相温度、 G 相温度、 $\mathbf{v}$ は S 相速度、 $R(T_S)$ は反応速度である。次に S 相の速度場が定常とする平衡状態近傍を仮定すると、上式中の変数は T_S と T_G となる。よって羽口から吹き込む G 相の温度を入力とすることにより、 S 相の温度が出力として得られる。もしそのような入出力データがあれば、それを用いて同定をおこなうことで、羽口の G 相温度から S 相温度への伝達関数が求まり、羽口 G 相温度を操作量とした S 相温度制御のコントローラを

設計することができる。そして S 相温度が制御できるならば、反応速度 R および融着帯が制御できることになる。これらの模式図を図6に示す。なお実高炉における流線上の固体相温度の分布を調べることは一般には非常に困難である。よって次には、実高炉内を再現するシミュレータを同定することにより、これを実現することを考える。

Fig. 6 Relation between input and outputs signals for identification

5. シミュレータの同定

前章の議論では、高炉の制御モデル導出のためには融着帯の制御モデルが必要となる。融着帯は、2相4成分モデルの場合 S_1 の体積分率で表現されるが、幾つかの仮定から、それは S 相温度 T_S の制御により実現される。また T_S の分布自体は T_G 、特に羽口温度により制御される。以上は物理式によりそれぞれの間の関係式が導かれるが、羽口 G 相温度と T_S の分布の間の伝達関数を理論的に求めるのが困難であり、これをシミュレータの同定により実現することを考えた。そしてここでは、

- 入力：羽口から吹き込む G 相温度(1入力)
- 出力： S 相の一つの流線上の温度(ℓ 出力)

の1入力 ℓ 出力系の制御モデル(ℓ は、流線上に存在する制御点の数)が必要となることを示した。

このようになるべく制御対象の物理的構造を保ったまま、低次の制御モデルをシミュレータを用いて導出するには、多入出力系の同定手法が不可欠となる。そこでここでは制御モデルを線形状態空間モデルで表すことを考える。状態空間モデルは、

- 制御系設計法が確立されている
- 多入出力系の表現が容易にできる

など、制御モデルとして有効な表現である。以上を実現する同定手法として、部分空間同定法⁽⁷⁾(Subspace-

based State-Space System Identification : (以後, 4SID 法と表現する)) を用いることを考える.

5.1 4SID 法

最小 2 乗法ベースの多入出力系の同定手法においては, それが複雑な条件を満足することが要求されるため, 低次元システムを得ることが困難とされてきたのに対し, 80 年代後半に提案された 4SID 法⁽⁷⁾ は, 比較的容易に多入出力システム (ここでは 1 入力多出力系) に対する低次の状態空間モデルを導出することから, 近年精力的に研究されてきている. ただし本手法は基本的に入出力データ行列の特異値分解を用いることからノイズに敏感であるという欠点を持ち, 実プラントの同定には不向きであるとされてきた. しかし本研究では, シミュレータから得られる入出力データを同定に利用するため, ノイズの影響を無視することができる. このことから 4SID 法が本研究では有効であることがわかる. 以下で 4SID 法の簡単な説明をしよう.

まず同定対象を次の線形・時不変・離散時間モデルとする.

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) = Cx(k) + Du(k) \end{cases} \quad (20)$$

ここで, 状態ベクトル $x(k) \in R^n$, 入力 $u(k) \in R^m$, 出力ベクトル $y(k) \in R^l$ であり, 入力, 出力はすべて観測可能とする. このとき, 出力 y , 入力 u を用いて, 式 (20) に示される状態空間行列を特定する問題を考える.

式 (20) の状態方程式から次のような入出力方程式を構成する.

$$Y = \Gamma_i X + H_i U \quad (21)$$

ただし各ベクトル, 行列は以下のように定義される. 入力ブロックハンケル行列:

$$U := \begin{bmatrix} u(k) & u(k+1) & \cdots & u(k+j-1) \\ u(k+1) & u(k+2) & \cdots & u(k+j) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u(k+i-1) & u(k+i) & \cdots & u(k+j+i-2) \end{bmatrix} \quad (22)$$

出力ブロックハンケル行列 Y も同様に定義される. 状態変数ベクトル:

$$X := [x(k) \quad x(k+1) \quad \cdots \quad x(k+j-1)] \quad (23)$$

拡大可観測性行列:

$$\Gamma_i := \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{i-1} \end{bmatrix} \quad (24)$$

マルコフパラメタからなるブロック Toeplitz 行列:

$$H_i := \begin{bmatrix} D & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ CB & D & 0 & \cdots & 0 \\ CAB & CB & D & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{i-2}B & CA^{i-3}B & CA^{i-4}B & \cdots & D \end{bmatrix} \quad (25)$$

ただし,

$$\text{rank } U = m \times i \quad (26)$$

を仮定する. ここで i は行列の行ブロック数, j は行列の列ブロック数である. i の大きさは同定するモデルの次数を制限する ($i > n$). j は同定に用いるデータ量に相当する.

次に式 (21) に対して $\text{Image}(U)$ への直交射影

$$\Pi_U = U^T(UU^T)^{-1}U, \quad (27)$$

および $\text{Image}(U)$ の直交補空間への射影

$$\Pi_U^\perp = I - U^T(UU^T)^{-1}U \quad (28)$$

をそれぞれ右からかけてやると,

$$Y\Pi_U = \Gamma_i X\Pi_U + H_i U \quad (29)$$

$$Y\Pi_U^\perp = \Gamma_i X\Pi_U^\perp \quad (30)$$

が成り立つ. ここで次の関係があることに注意する.

$$\text{rank } \Gamma_i = n \quad (31)$$

$$\text{rank}(X\Pi_U^\perp) = n \quad (32)$$

式 (31) は, Γ_i が可観測性行列ということ, 式 (32) は, X が n 次の状態ベクトルを並べたものということから成り立つ. これらより式 (30) において

$$\text{rank}(Y\Pi_U^\perp) = n \quad (33)$$

となることがわかる. これを特異値分解すると

$$Y\Pi_U^\perp = U_1 S_1 V_1 \quad (34)$$

となる. したがって式 (30), (34) から, 適当な正則行列 T を用いて

$$U_1 = \Gamma_i T \quad (35)$$

とかける. 正則行列 T を選ぶと

$$\Gamma_i = U_1 T^{-1} \quad (36)$$

となり Γ_i が求まる. また式 (33) からシステムの次数 n が求まる. 実際的には (34) 式の特異値分解における有意な特異値の個数を n とする. ここで C 行列は Γ_i の第一ブロック行から求められ, A 行列は次に示す Γ_i の性質を利用した次式から求めることができる.

$$\Gamma_i(1 : \ell(i-1), :)A = \Gamma_i(\ell+1 : \ell i, :) \quad (37)$$

ただし, $\Gamma_i(j:k,:)$ は, Γ_i の $j \sim k$ 行による部分行列とする. また B, D 行列は次のように求める. 式 (29) に左から $(U_1^\dagger)^T$, 右から疑似逆行列 $U^\dagger = U^T(UU^T)^{-1}$ をかけることにより,

$$(U_1^\dagger)^T Y \Pi_U U^\dagger = (U_1^\dagger)^T H_i \quad (38)$$

となる. これより H_i が決定し D, B が求まる.

これまでの議論から, 本研究で提案する制御モデル導出法の手順は, 基礎方程式から入出力を定め, シミュレータから制御モデルを導出することとなる. 図 7 に手順の模式図を示す.

Fig. 7 Design process from simulator to model for control

6. 数値実験

前章で提案した制御モデル導出の手法の有効性を確認するため, 本章では 2 相 4 成分モデルを用いた数値実験を行なう.

6.1 制御モデルの導出

2 相 4 成分モデルのシミュレータが再現したデータから,

入力: 羽口温度 (1 入力)

出力: 流線上に分布する S 相温度 (ℓ 出力)

を取り出し, 一つの流線に対する制御モデルを 4SID 法により導く過程をみる.

シミュレータの入出力データ

ここでは, 3.5 節で実験した定常状態遷移の入出力データを用いて同定をおこなう. 同定で用いる入出力データは, 図 8 右図に示すように, 羽口の G 相温度を入力 (次元 1), 注目する S 相流れにおける流線上の S 相温度を出力とする. ここでは S 相流線 ($x=5$) に注目し, その流線における * 印上 7 点の S 相温度を出力 (次元 7) とする.

同定結果

次に 4SID 法を用い, 1 入力 7 出力の制御モデルを導出する. 同定のための入出力データは, 図 8 右図に示したものである. 部分空間法におけるモデル次数の見

Fig. 8 Left figure: a steady state for identification, right figure: I/O signals used in identification (input signal of temperature of phase G at tuyere (dimension 1) and outputs of temperature of phase S at marked * on a flow line of the left figure (dimension 7))

積り⁽⁷⁾と次に示す時間応答図より, ここでは 10 次のモデルが比較的低次でかつ同定対象の特徴を捉えていると考えられる. なおどのような次数のモデルを選ぶかは, 制御モデル・コントローラの複雑さと入出力データ適合度とのトレードオフをとって決められる. これは実際の制御系設計における条件により左右されるため, ここでは提案手法が適用可能であることを示す一例を示すのに留めておく.

図 9 は導出された 10 次の同定モデルにおける, 図 8 右図の入力に対する 7 次元の出力 (実線) と, 同定対象であるシミュレータの 7 次元の出力 (破線) のプロットである. また, 図 10 では, 羽口温度の $T_G = 1.5$ から $T_G = 1.6$ へのステップ状入力に対する制御モデルの応答 (7 次元, 実線) およびシミュレータの応答 (7 次元, 破線) を示している. これらの結果から本数値例の制御モデルが, シミュレータの特性をとらえていることがわかる.

6.2 結果の考察

本稿でおこなった数値実験の結果から 4SID 法によって, シミュレータの特性をとらえた比較的 low order の制御モデルが導出可能であることがわかる. このことは, この制御モデルを利用したコントローラ的设计, また最終的には実機の自動制御の可能性を示している. また高炉に限らず, 大規模で複雑なシステムを再現するシミュレータの入出力データを利用した, なるべく元の物理モデルの物理的構造を崩さない制御モデルの導出手法となることが期待される.

Fig. 9 Responses of the identified model (order 10, solid line) for the input pattern shown by Fig.8 and that of the simulator (dashed line)

Fig. 10 Step responses of the identified model (order 10, solid line) and that of the simulator (dashed line)

7. おわりに

本稿では高炉を模した2相4成分モデルを例にとり、複雑なシステムの制御モデルを、元の物理モデルの構造をなるべく損なわず導出する手法を提案した。また数値実験を通して制御モデルを実際に求めた。得られた制御モデルが複雑なシステムの動特性をとらえていることを示し、提案手法の有効性を確認した。

本稿を通してキーポイントとなるのは制御モデル導出のためのシミュレータの同定である。ただし元の物理モデルの構造をなるべく損なわず、低次の制御モデルを導出するには、注目すべき複数の物理変数の間の入出力関係がなるべく保たれていることが望まれる。これを実現するには多入出力系の同定手法が不可欠となるが、本論文ではそれを4SID法を用いて解決している。4SID法は本来ノイズに対して弱い同定手法であるが、本稿のようにシミュレータの入出力データを用いるのであれば、そのような欠点が問題とはならないことがわかる。

なお今後の課題として、導出した制御モデルの閉ループ系の中での振るまいの評価、実システムと物理モデル・シミュレータの間の誤差とロバスト制御の適

用、定常状態近傍における局所的モデルから大局的モデルの導出について、などがあげられる。

文献

- (1) 的場祥行・高橋亮一, 鉄鋼業における制御理論の応用, 計測と制御, **29**-6 (1990), 518-526.
- (2) 高谷幸司, 高炉プロセスの数値解析モデル, 日本鉄鋼協会計測・制御・システム工学部会セミナー「大規模反応プロセスのモデリングと制御」資料, (1996), 27-32.
- (3) 杉山喬, 高炉内の流動・伝熱・反応解析, 日本鉄鋼協会第94・95回西山記念技術講座: 鉄鋼生産プロセスにおける数値計算 方法の適用, (1983), 131-173.
- (4) 津村幸治, 高炉制御モデルの構築, 日本鉄鋼協会計測・制御・システム工学部会セミナー「大規模反応プロセスのモデリングと制御」資料, (1996), 33-42.
- (5) 高見穎郎・河村哲也, 偏微分方程式の差分解法, (1994), 東京大学出版会.
- (6) 神部勉, 偏微分方程式, (1987), 講談社.
- (7) Moonen, M., De Moor, B., Vandenberghe, L., and Vandewalle, J., On- and Off-line Identification of Linear State-space Models, *Int. J. Control*, **49**-1 (1988), 219-233.
- (8) 中本政志・清水佳子・福田浩, プラント制御への多変数制御の応用, 計測と制御, **33**-5 (1994), 397-405.