

簡易言語を用いた物流シミュレータの加熱炉ラインへの適用

高橋 圭一[†]

田島 和典[‡]

近畿大学産業理工学部[†]

ニッテツ北海道制御システム (株) [‡]

1. はじめに

我々はこれまで産業廃棄物処理工場の現場スタッフが利用することを想定した簡易言語による物流シミュレータを開発してきた[1]。本シミュレータは、移動元と移動先とリードタイムを指定することで物流規則を定義することができ、種類別の物流規則や容器詰替規則など、より複雑な物流規則をモデリングできる。本稿では、連続式鋼材加熱炉（以降、単に加熱炉と呼ぶ）に対して[1]の適用を試みたので報告する。以降、加熱炉シミュレーションへの適用に際しての変更点、シミュレーション結果および考察を示す。

2. 加熱炉

2.1. 工程

本稿で対象とする加熱炉ラインを図1に示す。前工程より鋼材を受け取り、その鋼材を一定間隔で加熱炉内に装入する。加熱炉内ではコンベアによって鋼材が搬送され終端に到達した鋼材は後工程に送り出される。後工程には圧延機列があり所望の形状に圧延し製品長に切断される。加熱炉内は3つのゾーン（Z1～Z3）にわかれており、各ゾーンに設置されたガスバーナーと温度センサーを用いて温度制御される。各ゾーンには複数の鋼材を装入できる。また、各鋼材は圧延のための目標温度が決められており、その温度に到達するまで加熱炉内の各ゾーンで予め設計された昇温パターンに従って加熱される。

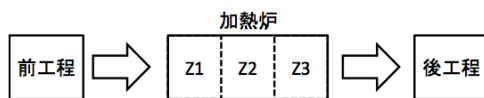


図1 加熱炉ライン

2.2. 加熱炉装入スケジュール問題

加熱炉では大量のエネルギーを消費するため、コスト低減のための様々な改善が実施されてきた[2][3][4][5]。本稿で注目する課題に加熱炉装入スケジュール問題がある。加熱炉の各ゾーンには複数の鋼材を装入できるが、各ゾーンの温度制御の目標温度は1つである。エネルギーロスを最小化するため鋼材と各ゾーンの目標温度の差を最小化するように、鋼材の装入順およ

び装入間隔を決定する必要がある。現状、熟練した技術者が装入スケジュールを作成しているが、本稿はこれら技術者の意思決定を支援することが目的である。

3. 提案手法

既開発の物流シミュレータ[1]を用いたモデリング方法と変更点について説明する。

3.1. 簡易言語

[1]は解体分別した廃棄物を格納して搬送する容器について拡張した時間つきカラーペトリネットを基本としている。鉄鋼における加熱炉および周辺の工程では容器には入れず素材をそのまま搬送するケースが多いため、モデリングを簡単にするため図2のように一般的な時間つきカラーペトリネットとした。トークンは（ID, 種別, 目標温度, 初期温度）のカラー情報を有する。アークは鋼材の種別に反応しトランジションの発火を促す。プレースは容量制限つきであり、プレースに到着したトークンが各々プレースの滞在時間を積算し、滞在時間がトランジションで定義した時間以上となったときに発火しトークンを移動する。図2では鋼材Aが設備1に到着後600秒経過すると、鋼材Aが種別1であれば設備2に移動する。



図2 時間つきカラーペトリネットによる物流規則

現場スタッフはペトリネットの構成要素より設備名や鋼種名の方が馴染みあるため、時間ペトリネットに対応した簡易言語を、プログラミング言語 Ruby をホスト言語とする内部 DSL で実装した。簡易言語の基本命令は容器を廃止したこと以外は[1]と同様である。図2を簡易言語で定義すると以下ようになる。

`move '設備1', '種別1', '設備2', 600`

3.2. シミュレーションの処理フロー

1)～5)をシミュレーション時刻ごとに実行する。4)は本稿で新たに追加した処理である。本稿では加熱炉装入スケジュールは手動で入力するため、鋼材情報と装入時刻を予め定義してお

く、2)はこの装入時刻に鋼材を設備に装入する処理である。次項にて4)について説明する。

- 1) シミュレーション終了検査
- 2) 鋼材装入処理
- 3) 物流規則実行（簡易言語）
- 4) 加熱炉温度制御・鋼材温度計算
- 5) シミュレーション時刻を1秒進める

3.3. 加熱炉温度制御・鋼材温度計算

加熱炉温度と鋼材温度は文献[5]の方式を採用し、それぞれ(1)(2)式で求める。 $T_j(k)$ はゾーンjの温度、 $f_j(k)$ はゾーンjのガス投入量、 $y^i(k)$ は鋼材iの温度であり、各式中の係数は $(a, b, c, d) = (0.9048, 1.4274, 0.8187, 0.1813)$ とする。

$$T_j(k+1) = aT_j(k) + bf_j(k) \quad (1)$$

$$y^i(k+1) = cy^i(k) + dT_j(k) \quad (2)$$

また、 $f_j(k)$ は(3)(4)式の数値型デジタルPIDアルゴリズムで求める[6]。 e_k は偏差（目標値-実績値）、 K_p は比例ゲイン、 T_I と T_D は積分時間と微分時間である。

$$f_j(k) = f_j(k-1) + \Delta f_j(k) \quad (3)$$

$$\Delta f_j(k) = K_p \left[(e_k - e_{k-1}) + \frac{\Delta t}{T_I} e_k + \frac{T_D}{\Delta t} (e_k - 2e_k + e_{k-2}) \right] \quad (4)$$

e_k を算出するためには目標値が必要となる。本稿では $f_j(k)$ の目標値は次のように求める。最終ゾーンをMとし、ゾーンMの目標温度を $T_{M \text{ target}}$ とすると、 $T_{M \text{ target}} = \max_i(y_M^i)$ とし、 $T_{M-1 \text{ target}}$ は $1.045T_{M \text{ target}}$ 、 $T_{M-2 \text{ target}}$ は $0.818T_{M \text{ target}}$ とする。

4. 評価

4.1. モデリング対象

図1の加熱炉をモデリング対象とする。各ゾーンにはそれぞれ20本まで鋼材を装入できる。各ゾーンのリードタイムは $(Z1, Z2, Z3) = (40 \text{ 分}, 40 \text{ 分}, 40 \text{ 分})$ とする。簡易言語による物流規則は以下のように定義する。:ALL はすべての鋼材種類に当該規則を適用することを表す。鋼材の初期温度は 20°C 、各ゾーンの初期温度は 900°C とする。

move 'Z1', :ALL, 'Z2', (40*60)

move 'Z2', :ALL, 'Z3', (40*60)

move 'Z3', :ALL, '後工程', (40*60)

4.2. 実験

装入スケジュールすなわち鋼材の装入順および装入間隔によるガス投入量と処理完了時間を比較する。ガス投入量は $\sum_{j,k} f_j(k)$ で求める。処理完了時間とは加熱炉に最初の鋼材を装入してからすべての鋼材が加熱炉から出るまでの時間とする。実験条件を表1に示す。鋼材の装入間

隔は2分とするが、条件3,4については目標温度が変化する鋼材を装入時のみ20分とした。

表2に結果を示す。ここでガス投入量に注目する。条件2・4は条件1・3よりそれぞれ少ないため、鋼材目標温度を低→高の順に装入する方がよい。条件3・4は条件1・2より多いが、条件1と3および条件2と4の差はそれぞれ35と36となり、装入間隔を大きくした場合は高→低の順に装入する方がよいことがわかった。

表1 実験条件

条件	装入する鋼材の条件
1	$1100^\circ\text{C} \times 30 \text{ 本} \rightarrow 1050^\circ\text{C} \times 30 \text{ 本}$
2	$1050^\circ\text{C} \times 30 \text{ 本} \rightarrow 1100^\circ\text{C} \times 30 \text{ 本}$
3	$1100^\circ\text{C} \times 30 \text{ 本} \rightarrow 20 \text{ 分} \rightarrow 1050^\circ\text{C} \times 30 \text{ 本}$
4	$1050^\circ\text{C} \times 30 \text{ 本} \rightarrow 20 \text{ 分} \rightarrow 1100^\circ\text{C} \times 30 \text{ 本}$

表2 実験結果

条件	ガス投入量 ($\times 10^2$)	処理完了時間 (分)
1	497	238
2	489	238
3	532	256
4	525	256

5. まとめ

既開発の簡易言語を用いた物流シミュレータを加熱炉に適用した。今後は操業データを用いた各種係数のチューニングおよび評価を行い、装入スケジュールの最適化などを行いたい。

参考文献

- [1] 高橋圭一，基村雄作，簡易言語を用いた産業廃棄物処理工程向け物流シミュレータの開発，スケジューリング・シンポジウム 2010 講演論文集，pp.151-156，2010/9/10-11
- [2] 伊東弘一，中川泰忠，電気式連続加熱炉の保温設計に対する多目的最適化，日本機械学会論文集 C 編，Vol.53，No.487，pp.800-806，1987/03/25
- [3] 佐藤智一，川北茂，丸山昭男，千田雄治，佐坂晋二，棒鋼抽出ピッチ制御エキスパートシステム，電気学会論文誌 C 編，Vol.110，No.8，pp.484-489，1990
- [4] 鷺北芳郎，城島健一郎，阪本浩一，熱間圧延プロセスにおける加熱炉装入順・圧延順の最適化，第54回自動制御連合講演会，pp.1545-1548，2011/11/19-20
- [5] 藤井奨，裏山晃史，加嶋健司，井村順一，黒川哲明，足立修一，鋼材加熱炉の装入スケジュールリングと燃焼制御の同時最適化，鉄と鋼，Vol.96，No.7，pp.434-442，2010
- [6] 広井和男，宮田朗，シミュレーションで学ぶ自動制御技術入門，CQ出版社，2004