

多品種生産システムのためのパイプレスバッチプラント

星野智史 関宏也 仲勇治 (東京工業大学)

Pipeless Batch Plant for Multiproduct Manufacturing System

*Satoshi HOSHINO, Hiroya SEKI, and Yuji NAKA (Tokyo Institute of Technology)

Abstract— Chemical process industries need to be able to adapt to the fast changing market to meet consumer demands. A pipeless batch plant for a multiproduct manufacturing system is developed in this paper. For more efficient use of the system resources, such as movable vessels and coupling robots, under a changing situation, operational models for the route planning, operation dispatching, and task assignment are proposed. Through a simulation experiment, the effectiveness of the operational models is discussed.

Key Words: Pipeless Batch Plant, Multiproduct Manufacturing System

1. 序論

化学プロセス産業では、パイプレスバッチプラントが、市場における生産需要の急激な変化に迅速に対応することができ、さらに、高付加価値の製品を多品種少量生産するのに適しているとして、注目されている。パイプレスバッチプラントはバッチプラントの一種で、当該プラントでは、製品の原材料が、あるプロセスから他のプロセスへと移動機構を有した容器によって移送される。各プロセスステーションでは、容器あるいは容器内の材料に対して、仕込み、混合、反応、払出しなどといった化学的な生産プロセスが施される。

従来のバッチプラントでは、材料は配管網を通じて様々なプロセス工程へと移送され、最終製品が生産されてきた。パイプレスバッチプラントは、すでに潤滑油、接着剤、調合薬、インク、塗料などといった化学製品を生産するために導入されている。当該プラントの特徴として、配管網の代わりに移動可能な容器を用い、材料そのものを移送させることが可能である。そのため、従来のバッチプラントと比べ、作業の柔軟性や取扱い製品切替え時(バッチ間)のコンタミネーション防止などといった利点がある。

パイプレスバッチプラントを扱った従来研究の多くは、生産スケジューリングに焦点を当ててきた。当該スケジューリング問題は、主に混合整数計画(Mixed Integer Linear Programming: MILP)法により定式化されてきた(例えば[1][2])。Realfらは、MILP法を適用した生産スケジューリングを行う際、プラントの性能や経済性といった観点から、プロセスステーションの数や配置などといったレイアウト、ならびに移動容器の台数設計を行っている[3]。しかしながらMILP法による定式化は、問題の規模や定式化の精度に依存し、計算コストが増大してしまう[4]。Huangらは当該スケジューリングを制約充足問題(Constraint Satisfaction Problem: CSP)として定式化し、メイクスパンを最小化するための最適化を行っている[5]。彼らはさらに、プラントのレイアウトとそれともなう移動容器の動作までも考慮した、統合スケジューリング手法を提案している[6]。しかしながら、これら従来研究には、(1) 少ない移動容器の台数、(2) ステーション間の容器の移動時間が一定、(3) ステーションでのプロセス時間

が一定、(4) 連結ロボットの存在が考慮されていない、等々の仮定ならびに問題が存在する。

Gonzalezらは、MILP法を適用して得られたスケジューリング解に基づき、離散事象生産シミュレーションを行っている[7]。その結果、容器の移動速度やステーションでのプロセス時間に偏差がある場合、スケジュール通りの生産量が得られない場合があることが示された。さらに従来研究では、使用される移動容器が、どれも $10[m^3]$ 以上と大きく、そのため移動性能が低く、移動の際の高度な動作が困難となる。また、大容量の容器が移動することは、安全性の観点からも大きな問題となってきた。

2. チャレンジングポイント

本研究では、(I) 安全性の観点から、移動容器の容量を減らし台数を増やす。(II)(III) 偏差を伴った容器のステーション間移動時間ならびにプロセス時間を考慮する。さらに、(IV) 移動容器と他のプロセス機器との接続作業を担う連結ロボットを投入する。そして、これら移動容器と連結ロボットを高度に動かし、当該プラントにおける生産効率を向上させることがチャレンジングポイントとなる。そこで本研究では、以下の3つの作業モデルを構築する。

1. 移動容器の経路計画
2. 連結ロボットの接続作業ディスパッチング
3. 移動容器への作業タスク割当て

3. パイプレスバッチプラント

文献[3]や[6]より、パイプレスバッチプラントのレイアウトとしては、従来、ヘリングボーン型、円型、そして直線型の3つが対象とされてきたことが分かる。本研究では、これら3つのレイアウトを包括した新たなレイアウトとして、Fig.1が示す巡回型パイプレスバッチプラントシステムを対象とする。当該プラントレイアウトの特徴として、本線、追越し、そして中間経路を設けることにより、本線経路あるいはプロセスステーションにて作業渋滞が生じていたとしても、移動容器が走行経路を状況に応じて適切に計画・変更することにより、効率的な作業を遂行することができる。

各ステーションでは、本来、1.章で述べたような仕込み、混合、反応、払出しなどといった、特定の生産

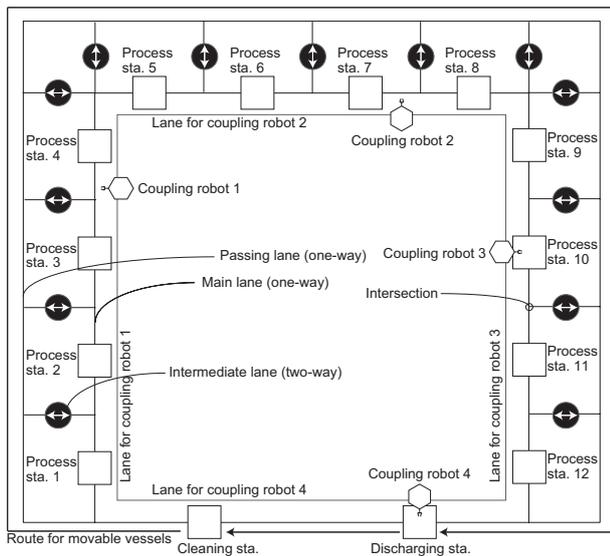


Fig.1 Circuit Layout Structure of Pipeless Bath Plant

プロセスが実行されるが、本研究では多品種生産プラントを想定しているため、ステーション1～12はこれら全てのプロセスを実行することができるものとする。ただし、製品の払出しならびに容器内部の洗浄は必要不可欠なプロセスとなるため、当該ステーションに関してはそれぞれ一つずつ専用のステーション設けた。

空の移動容器がステーションに到着すると、仕込みのため原料タンクと容器が接続されなくてはならない。また、混合や反応の際には、混合機や反応測定器と容器を接続する必要がある。そこでこれらのプロセス機器と容器を接続するための連結ロボットが、容器が移動する本線経路のさらに内側に移動する。当該ロボットに対しては、それぞれ特定の移動経路が設けられる。

4. パイプレスバッチプラントの作業モデル

4.1 移動容器の経路計画

Fig.2 に、経路上を走行中の移動容器が、現在地から目的地のステーションに対して経路計画を行う様子を示す。本研究では、(a) 最短経路計画、(b) 一つ先のステーションの状況までを考慮した動的経路計画、(c) 目的地までのステーション全てを考慮した動的経路計画、の3種類の経路計画手法を移動容器に実装する。

Fig.2 のスタートステーションにて、移動容器(MV1)がゴールステーションまでの経路を計画する際、(a) の最短経路計画ではMV2やMV3により、経路上で停止しなくてはならない。これに対して、変動する状況に対応するため、(b) では、容器間(例えばMV1とMV2)で通信を行い、走行経路を再計画する。このとき、再計画される経路の候補1, 2, 3があるが、1の経路を選択した場合、赤矢印で示されるように、M3により再度追越し経路に向かう経路を計画しなくてはならず、また、2の経路を選択した場合は、MV3によりステーション手前の経路上で停止しなくてはならない。一方(c)により再経路計画した場合、MV1は全容器と通信、目的地までの全ステーションの状況を把握し、それらに基づき経路3を選択する。なお、(b)と(c)の経路計画は、本線経路の交差点通過時に行われる。

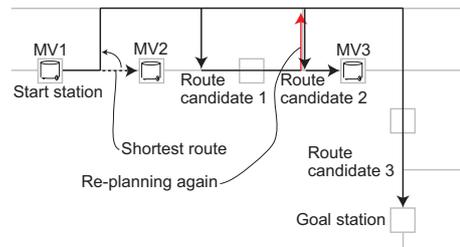


Fig.2 Route (Re-)Planning

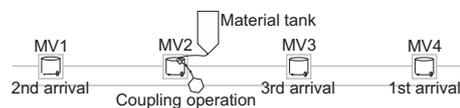


Fig.3 Operation Dispatching

4.2 連結ロボットの接続作業ディスパッチング

Fig.1の示す連結ロボットのうち、1から3は、ステーション1～4, 5～8, 9～12の4つのステーションで移動容器とプロセス機器との接続作業を行う。したがって、同時に複数台の容器が別々のステーションに到着した際、ロボットが効率良く接続作業を遂行するための作業ディスパッチングを行う必要がある。そこで本研究では、(a') ステーションへの到着順(FIFO)、(b') 近傍、(c') 全容器を処理するための総移動距離最小化、の3種類のディスパッチングルールを基に、次に作業する容器ならびにステーションを決定する。

Fig.3は、ある連結ロボットがMV2と材料タンクの接続作業を行っている最中に、その他の全ステーションへ移動容器がMV4, MV1, MV3の順で到着した場合を示す。このとき、(a')のルールを適用すると、当該ロボットは左右への往復移動を繰り返さねばならない。一方、(b')あるいは(c')を適用すると、MV2 → MV3 → MV4 → MV1、あるいは、MV2 → MV1 → MV3 → MV4の順で接続作業が実行される。

4.3 移動容器への作業タスクの割当て

Fig.1の示す洗浄ステーションにて移動容器が洗浄された後、次に実行する生産タスクが容器へと割当てられる。マテリアルハンドリングシステムでは、AGVに対する製品搬送のためのディスパッチングルールがすでに提案されており[8]、これをパイプレスバッチプラントへ適用した研究もなされている[9]。しかしながら、AGVや移動容器の次の目的地のみを決めるためのヒューリスティックルールが考慮されてきた。

一般的なマテリアルハンドリングシステムと、パイプレスバッチプラントにおける生産システムの違いとして、後者では、移動機すなわち容器と搬送物(材料)を切り離して考えることができない。また、各製品はそれぞれのレシピにしたがって生産され、全工程が同一の容器によって遂行される。したがって、数ある生産オーダ、すなわちタスクの中から、その都度変動するシステム環境に適したタスクを選択し、容器に割当てて必要がある。そこで本研究では、以下の評価関数に基づきタスク($Task_k$)を容器へと割当てる。この評価関数は、ある時刻におけるシステム内での全タスク実行状況から、最も類似度の低いタスクを選択する

ことを意味している。

$$\text{minimize } \sum_n Task_{n,k}(ExeTask_n - Task_{n,k})$$

ここで、 n はステーション、 k は参照するタスクのことである。また、 $ExeTask_n$ は、ステーション n にてプロセスを施されている容器ならびに、実行中のタスクレシピにて当該ステーション (n) が目的ステーションの一つになっている容器の合計台数のことである。 $Task_{n,k}$ には、 k 番目の参照タスクのステーション n が目的地か否かで、0 か 1 の二値変数が与えられる。

ただし、この評価関数により全ての未遂行タスクを参照し、そこから一つのタスクを選択し移動容器へ割当てた場合、作業の前半にプロセス工程数の少ないタスクが集中し、後半にプロセス工程数の多い、すなわち負荷の高いタスクが残ってしまう。そこで本研究では、(a'') ランダムタスク割当て、(b'') 全タスク参照割当て、(c'') 部分タスク参照割当て、の3種類の割当て方策に基づき、タスクを容器に割当てる。

5. シミュレーション実験

5.1 実験条件

4.1, 4.2, 4.3 節より、本シミュレーション実験では、 $3 \times 3 \times 3 = 27$ 通りの作業モデルを実装し、作業完遂までに要した時間によりそれらと比較・評価する。

タスク数は 200、ステーションでのプロセス時間は、1 ~ 12 では 30 ~ 80 [s] でランダムに決定、レシピには各ステーションに対して 0 か 1 の二値変数が 2/3 と 1/3 の割合で与えられ、1 の場合には当該ステーションに移動容器が向かう。払出しステーションでは 10 ~ 40 [s]、洗浄ステーションでは 20 ~ 80 [s] の時間をランダムに要するものとした。

その他、4.3 節の (c'') に関して、割当ての際のタスクの参照範囲を 10 タスクとする。移動容器の台数は、5, 10, 15 台投入し、それらに対する各作業モデルを実装したシミュレーション実験を行った。

5.2 作業モデルによる有効性の比較・評価

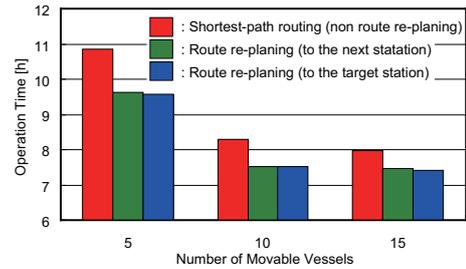
Table 1 に、各移動容器の投入台数に対するシミュレーション結果を示す。平均時間には全 27 通りの組合せの平均作業完遂時間が、ベストには最も作業時間が短かったときの作業完遂時間が、ワーストには最も長かったときの作業完遂時間が示されている。なお、ベストおよびワーストの作業時間の下には、そのときの作業モデルの組合せが示されている。

この結果から、各作業モデルの組合せにより、ベストの作業時間は移動容器の台数に関わらず、平均作業時間に対して 0.5 [h] 以上、ワーストの作業時間に対して、1.0 ~ 2.0 [h] 以上短縮されていることが分かる。

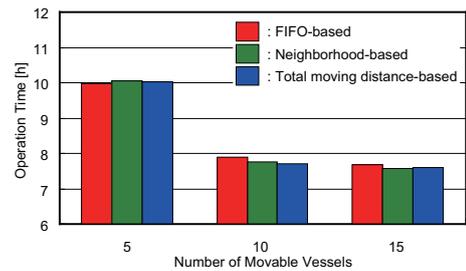
Fig.4 に、経路計画、作業ディスパッチング、ならびにタスク割当てが作業完遂時間に及ぼす影響を示す。なお、(a) ~ (c)、(a') ~ (c')、(a'') ~ (c'') の各 3 種類の影響を評価するため、例えば Fig.4(a) では、容器の投入台数に対して、経路計画を (a) と固定し、その他 9 通りの作業モデルの組合せでシミュレーションを行い、そのときの平均値を示している。

Table 1 Total Time with 27 Operational Models

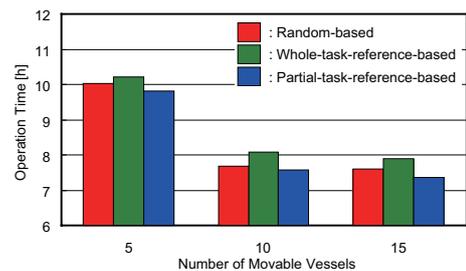
# of vessels	Total operation time [h]		
	Average	Best	Worst
5	10.02	9.23	11.18
10	7.78	(b)(c')(c'')	(a)(b'/c')(b'')
		7.16	8.62
15	7.61	(b)(c')(c'')	(a)(a')(b'')
		7.12	8.27
		(c)(b')(c'')	(a)(c')(b'')



(a) Route planning



(b) Operation dispatching



(c) Task assignment

Fig.4 Impact Evaluation

この結果から、Fig.4(a) の動作計画、続いて Fig.4(c) のタスク割当てが作業時間に影響を及ぼすことが分かった。なお、Fig.4(c) では、全タスクを参照したときでは、ランダムにタスクを割当てたときより作業時間がかかってしまう結果となった。一方で Fig.4(b) より、連結ロボットの作業ディスパッチングは、作業時間にあまり影響を及ぼさないことが分かった。これは、一台

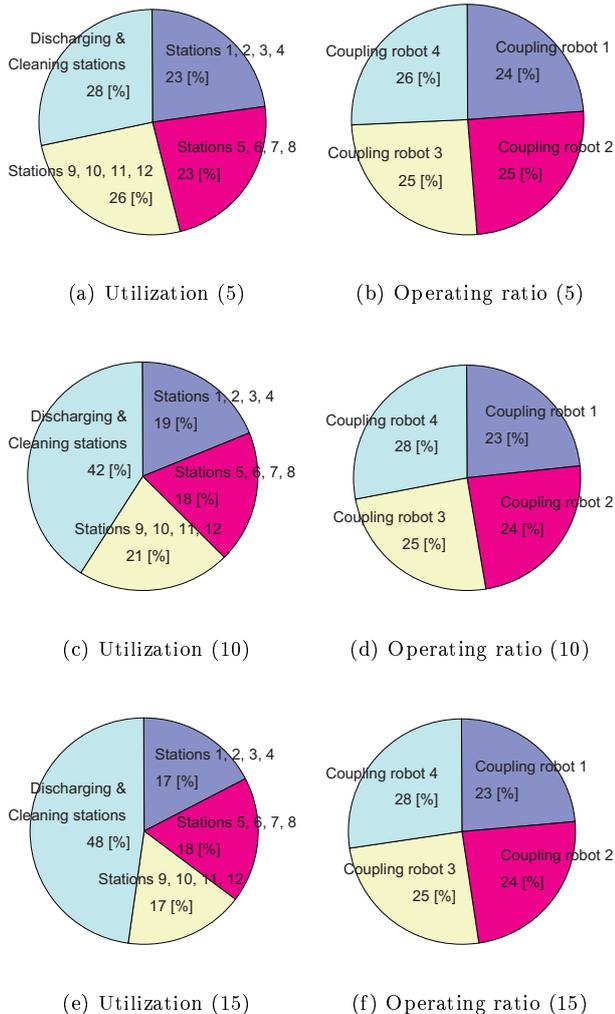


Fig.5 Resource Utilization

の連結ロボットが担当するステーションが4つあるいは2つのみ、各ステーションの距離が短い、などといった理由が原因であると考えられる。ただし、Table 1より、他の作業モデルとの組合せでは、一定の効果を得ることができる。

5.3 考察

Fig.5に、Table 1のベストのときに得られたステーションにおける移動容器の滞在時間の比率、ならびに各連結ロボットの作業時間比率を示す。

Fig.5(a)とFig.5(c)ならびにFig.5(e)を比較すると、移動容器の投入台数の増加にともない、払出しおよび洗浄ステーションにおける移動容器の滞在時間の比率が増加していることが分かる。これは、効率的な作業モデルの適用により、ステーション1~12でのスループットは上がったが、その一方で、ステーション数が少なく、追越し経路のない2つのステーションに移動容器が頻繁に到着するようになり、当該ステーションがシステム内のボトルネックとなってしまったためである。このとき、Fig.5(b)とFig.5(d)ならびにFig.5(f)を比較すると、各連結ロボットはほぼ同等の割合で作業を実行していることが分かる。すなわち、全ての連

結ロボットは均等かつ十分に作業しているにも関わらず、2つのステーションにボトルネックが発生してしまっている。

著者らはこれまでに、時間とともに変動、かつ部分的に生じる作業負荷に対して、あるロボットがリアクティブに他のロボットの作業を支援することの有効性を示している[10]。本研究では、各連結ロボットは自身の経路上のみにて作業を遂行するという条件設定としたが、負荷分散のため、状況に応じて他のロボットが担当するステーションへの作業ディスパッチングを行うことで、効率化を図れるものと考えられる。

6. 結論

本研究では、多品種の化学製品を生産するためのシステムとして、パイプレスパッチプラントを対象に、当該システム内で効率的に動作するための経路計画手法を移動容器群に実装した。また、プロセス機器と移動容器を接続する連結ロボットの作業を考慮し、当該ロボットヘディスパッチングルールを適用した。さらに、パッチプラント特有のレシピを考慮したタスク割当て方策を提案した。そして、これら作業モデルは、その組合せによりシステムの生産性を向上させることを示した。今後は作業の負荷状況に応じて、容器だけでなく連結ロボットも柔軟に動作させるための行動則を考慮する。

- [1] J.-W. Bok *et al.*: "Continuous-Time Modeling for Short-Term Scheduling of Multipurpose Pipeless Plants," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 37, no. 9, pp. 3652-3659, 1998.
- [2] K.-H. Lee *et al.*: "Continuous Time Formulation of Short-Term Scheduling for Pipeless Batch Plants," *Journal of Chemical Engineering of Japan*, vol. 34, no. 10, pp. 1267-1278, 2001.
- [3] M.J. Realf *et al.*: "Simultaneous Design, Layout and Scheduling of Pipeless Batch Plants," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 20, no. 6, pp. 869-883, 1996.
- [4] W. Huang *et al.*: "Scheduling of Batch Plants: Constraint-based Approach and Performance Investigation," *International Journal of Production Economics*, vol. 105, no. 2, pp. 425-444, 2007.
- [5] W. Huang *et al.*: "Scheduling of Pipeless Batch Plants Using Constraint Satisfaction Techniques," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 24, no. 2, pp. 377-383, 2000.
- [6] W. Huang *et al.*: "Integrating Routing and Scheduling for Pipeless Plants in Different Layouts," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 29, no. 5, pp. 1069-1081, 2005.
- [7] R. Gonzalez *et al.*: "Operation of Pipeless Batch Plants - I. MILP Schedules," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 22, no. 7, pp. 841-855, 1998.
- [8] P.J. Egbe *et al.*: "Characterization of Automatic Guided Vehicle Dispatching Rules," *International Journal of Production Research*, vol. 22, no. 3, pp. 359-374, 1984.
- [9] R. Gonzalez *et al.*: "Operation of Pipeless Batch Plants - II. Vessel Dispatch Rules," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 22, no. 7, pp. 857-866, 1998.
- [10] S. Hoshino *et al.*: "Development of a Flexible and Agile Multi-Robot Manufacturing System," *17th IFAC World Congress*, pp. 15786-15791, 2008.