

スケジューリング問題のための動的支援システムの構築

○青松祐亮, 出口弘 (東京工業大学) 倉田正, 石塚康成 (株式会社パイケーキ)

Construct of Dynamical Support System for Scheduling problem

*Y. Aomatsu and H. Deguchi (Tokyo Institute of Technology) T. Kurata and Y. Ishizuka(Piecake, Inc)

概要— 工場でのスケジューリング計画としてガントチャートが用いられるが、プロジェクト遂行の過程において資源の破損や様々なイレギュラーが生じることで、スケジュールが大きく変化してしまうことがしばしば起こる。この問題に対して、出口らの研究で資源を割当てるための動的スケジューリングのモジュールにより、見える化による設計支援が可能となったが、材料の調達計画が考慮されていない現状となっている。この背景から、本研究ではプロジェクト遂行中において生じる境界条件の変更を動的に評価してガントチャートを作成すると同時に、交換代数を用いて資材の原価や機械の稼働時間などの原価コスト管理をできるシステムの実装を検討する。

キーワード: 材料調達問題, 資源寄りき型動的スケジューリング, 交換代数, AADL

1 背景

近年、工場における工程のスケジューリングは市場の著しい変化に対応するため、複雑な意思決定を必要としている。どの工程においても高品質な製品を生産するために、多品種少量生産のための工程が組まれている。そのためスケジューリング問題は複雑化し、少数の熟練した専門家にしか扱えない状況となっている。また、工場におけるスケジューリング問題で、ガントチャートを作成しても資源の手配が見つからない、予想外のトラブルにより工数が伸びるなどの事態が生じる可能性がある。さらに現場でこうした問題があった時は経験と勘に頼ってきている現状がある。したがって、ある時点での着手可能なタスクを動的に計算し、割当可能な資源を割り当てるスケジューリングシステムが必要となる。

従来スケジューリング問題はORおよびコンピュータサイエンスの分野における基礎的な研究課題として位置づけられており、今後社会インフラを支える技術として発展していくものと予想されている¹⁾。最も一般的なスケジューリングではジョブショップ・スケジューリング問題(以下JSPとする)が挙げられ、各々のタスクが2台以上の機械で予め指定された順序で処理される場合に、機械の全体稼働時間の最適処理順序を決定する問題となっている。JSPは主に最適解を求める立場から研究され、遺伝的アルゴリズムを含めた局所探索法³⁾や分岐限界法²⁾などの手法が提案されている。しかし、JSPは1つの機械が複数のタスクを処理することができないため、1製品の生産工程が煩雑化すると最適解を導き出すことが困難となる。

スケジューリングに関する先行研究として、出口らはタスクの集合から構成される複数のプロジェクトを並列に処理し、数理的に定式化された資源寄りき型の動的スケジューリングを提案した⁴⁾。資源がプロジェクトを構成するタスクに動的に割り付く仕組みのため、JSPとは違った新たなタイプのスケジューリング問題となっている。この手法の結果、プロジェクト遂行中にイレギュラーが生じていても動的に資源割当の最適解を導き出すことができ、再設計可能となる事が示されている。

この手法により工程のスケジューリング問題は改善

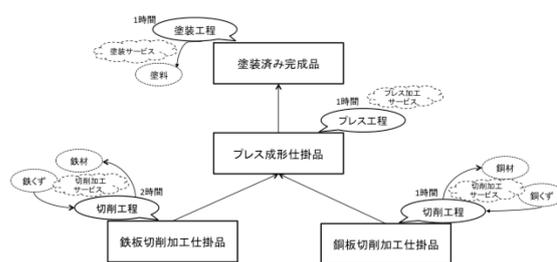


Fig. 1: 製品の製造単位プロジェクト。

できるが、生産に関するスケジューリングが考慮されず、材料調達の問題が依然として残っている。製造プロジェクトの中で必要な材料が無制限生産可能である条件下でスケジューリングが行われているため、調達計画も考慮しなければならない。

2 目的

スケジューリング問題を扱うにあたり、工程の受注量、生産コストなどの相反する制約のトレードオフが考慮されていないため、このような材料調達問題の改善を目的とする。プロジェクト遂行の過程でしばしば生じる境界条件の変更を動的に評価し、ガントチャートを作成すると同時に、資材の原価や機械の稼働時間、CO2や汚染物質のような環境情報などのコストの消費状況を導出するシステムの実装を検討する。

3 方法論

製品を製造する事例としてFig. 1のような塗装済み完成品の半順序構成の生産プロセスを考える。鉄板切削加工仕掛品と銅板切削加工仕掛品の作業を出発点とし、2つの作業が完了した後にプレス工程、塗装工程を経て塗装済み完成品となる一通りのプロセスを単位プロジェクトとする。

3.1 スケジューリングのアルゴリズム

本研究におけるスケジューリング問題として、出口らが提案した資源寄りき型スケジューリングを扱う。本事例をもとに、スケジューリング問題を定式化する。ここでは、塗装済み完成品の製造プロジェクト数を3個、

資源の数を5個と仮定する.

$$ProjectSet = \{p1, p2, p3\} \quad (1)$$

$$Task = \{Ic, Cc, Pm, Fm\} \quad (2)$$

$$ProfSet = \{Cut, Press, Set\} \quad (3)$$

$$ResSet = \{r1, r2, r3, r4, r5\} \quad (4)$$

初期条件としてプロジェクト集合, タスク集合, 職能集合, 資源集合を(1),(2),(3),(4)に与える. (2)のIc,Cc,Pm,Fmはそれぞれ鉄板切削加工, 銅板切削加工, プレス成形加工, 塗装加工を表し, プロジェクト集合のp1にTask[p1], p2にTask[p2], p3にTask[p3]が存在する. (3)はそれぞれ切削機, プレス機, 塗装機を表す. ここで, タスクと職能の関係をTask_Professionとし, 職能と資源の関係をProfession_Resourceとした時に以下のかたちとなる. また, タスク集合, 職能集合, 資源集合の関係図をFig. 2に示す.

$$Task_Profession \subseteq Task \times ProfSet$$

$$Profession_Resource \subseteq ProfSet \times ResSet$$

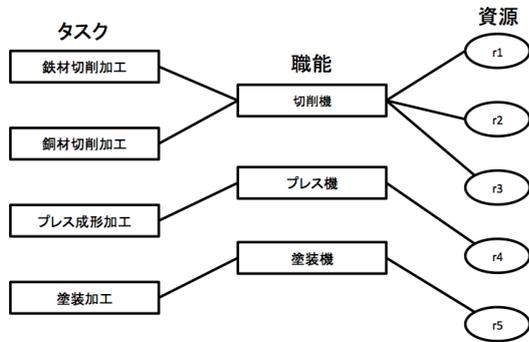


Fig. 2: タスク, 職能, 資源の関係.

タスク集合を未終了タスク集合, 着手可能タスク集合, 仕掛けタスク集合, 終了タスク集合に分類し, 資源集合は未割当済資源集合と割当済資源集合に分類する. 1つのプロジェクトにおける1ステップごとの大まかな流れをFig. 3に示す.

未終了タスク集合から着手可能なタスク集合を洗い出し, 着手可能タスク集合の中から実行可能な職能を持つ資源を, 割当可能資源集合の中から割当てる. また, 資源はサイズの小さい順から割り当てられ, 割り当てるタスクがいくつかある場合は実行時間の長いものを優先し, 複数のタスクの中で同じ資源があった場合は単能工を優先する. ここで単能工は, 職能とタスクが一对一对応となる職能を示し, 多能工は一对一对応とならないものとなる. 本事例の場合, プレス機と塗装機が単能工となり, 切削機は多能工として扱われる.

割り当てられた資源は割当済資源集合に遷移し, 割当対象のタスクが終了タスク集合へ遷移したならば未割当資源集合に戻り, 再び着手可能タスク集合から条件を満たすタスクに割当てるフローとなる.

ここで, 事例を用いて具体的に着手可能タスク集合を計算する. まず最初に着手可能なタスク集合の洗い出しを行う. t時間目の時点での割当可能資源集合を $\Omega(t)$ で表す.

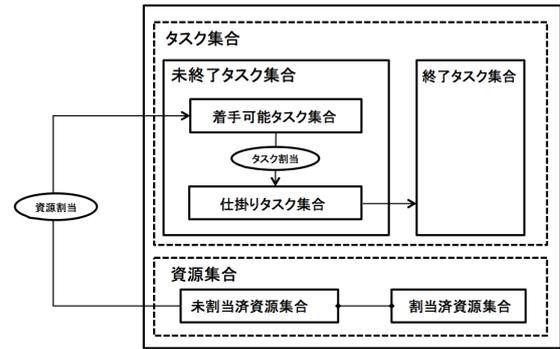


Fig. 3: スケジューリングの流れ.

$$Ic = \{r1, r2\}, Cc = \{r1, r2\}$$

$$Pm = \{r3, r4\}, Fm = \{r5\}$$

$$\Omega(0) = \{r1, r2, r3, r4, r5\}$$

$$ABegin_TASKS[p1] = \{Ic[p1], Cc[p1]\}$$

$$ABegin_TASKS[p2] = \{Ic[p2], Cc[p2]\}$$

$$ABegin_TASKS[p3] = \{Ic[p3], Cc[p3]\}$$

$$AssignableResource[ProjectSet](Ic[ProjectSet]) = \{r1, r2\}$$

$$AssignableResource[ProjectSet](Cc[ProjectSet]) = \{r1, r2\}$$

r1とr2の2つの資源に対して, 割当可能なサイズの小さい資源からタスクへの割当をまず優先して, 次に工数の長いタスクへの割当を優先し, 割当可能な資源が2つ以上あるときには, 単能工の資源を優先して割当てるという, 最少コスト最長工程単能工優先割当法で資源を割り付ける.

$$|AssignableResource[ProjectSet](Ic[ProjectSet])| = 2$$

$$|AssignableResource[ProjectSet](Cc[ProjectSet])| = 1$$

ここから, p1のIc[p1]にr1が割り付けられ, p2のIc[p2]にr2が割り付けられることが決定する. タスクIcは2時間かかるので, 2時間目にr1,r2は解放され, タスクIc[p1],Ic[p2]は終了タスク集合に遷移される. 次に割付可能となるのはIc[p3],Cc[p1],Cc[p2],Cc[p3]となり, 同様に割付を行う.

$$AssignableResource[p3](Ic[p3]) = \{r1, r2\}$$

$$AssignableResource[ProjectSet](Cc[ProjectSet]) = \{r1, r2\}$$

ここでIc[p3]にr1が割り付けられ, 工期が1時間のCc[p1]にr2が割り付けられる. 3時間目以降は前期末までの終了タスク集合を除去し, 着手可能タスク集合を再度求め, そこに資源を割り振る.

この作業を繰り返すことで, 最終的に7時間でスケジューリングが終了する. この割付表をTable1に示す. タスクごとに, ある時点での割り付けられている資源がわかることから, プロジェクト遂行中のイレギュラーが生じた場合でもその事態に応じて動的にタスクの割当を変更することができる.

	1hour	2hour	3hour	4hour	5hour	6hour	7hour
Ic[p1]	r1	r1					
Cc[p1]			r1				
Pm[p1]				r3			
Fm[p1]					r5		
Ic[p2]	r2	r2					
Cc[p2]			r1				
Pm[p2]				r3			
Fm[p2]					r5		
Ic[p3]		r2	r2				
Cc[p3]				r1			
Pm[p3]					r3		
Fm[p3]						r5	

Table 1: タスクごとの割付表.

3.2 交換代数によるコスト原価管理

スケジューリング問題に併せて、簿記の抽象化である交換代数⁵⁾を基盤に、生産プロセスの中での取引を代数形式で行う。交換代数では、資材や価額の流入に限定されず、環境情報や機械の稼働時間の情報などを代数的に記述できる。本事例での仕掛品および完成品のトランザクションを交換代数で記述すると以下となる。

X[鉄板切削仕掛品製造取引]

= 1 < 鉄板切削加工仕掛品, 個, #, # >
+5 < 鉄くず, Kg, #, # >
+20 < 鉄材, Kg, #, # >
+2 < 切削加工サービス, 時間, #, # >

X[銅板切削仕掛品製造取引]

= 1 < 銅板切削加工仕掛品, 個, #, # >
+2 < 銅くず, Kg, #, # >
+8 < 銅材, Kg, #, # >
+1 < 切削加工サービス, 時間, #, # >

X[プレス成形仕掛品製造取引]

= 1 < プレス成形仕掛品, 個, #, # >
+1 < 鉄板切削加工仕掛品, Kg, #, # >
+1 < 銅板切削加工仕掛品, Kg, #, # >
+1 < プレス加工サービス, 時間, #, # >

X[塗装済み製品製造取引]

= 1 < 塗装済み完成品, 個, #, # >
+1 < プレス成形仕掛品, 個, #, # >
+2 < 塗料, Kg, #, # >
+1 < 塗装サービス, 時間, #, # >

交換代数のデータの表現は、< 名前, 単位, 時間, 主体 > の4つの項目から成り立ち、係数となる箇所にはハットが付いているものは減少を表しており、マイナスの代わりとして用いられている。これは負のストックの増加として扱うことで、冗長度を高めるためである。原則的に資産・負債・純資産の扱い方は簿記の概念と同様である。また、情報として不要な部分には#という記号で表示している。交換代数で記述したそれぞれの製造取引を、貸方と借方の形式で表したものをTable 2に示す。

鉄板仕掛品製造の取引を例にすると、1つの鉄板切削加工仕掛品を作るのに20kgの鉄材と切削加工サー

鉄板切削加工仕掛品製造取引				銅板切削加工仕掛品製造取引			
借方	借方	貸方	貸方	借方	借方	貸方	貸方
鉄板切削加工仕掛品	1個	鉄材	20Kg	銅板切削加工仕掛品	1個	銅材	8Kg
鉄くず	5Kg	切削加工サービス	2時間	銅くず	2Kg	切削加工サービス	1時間

プレス成形仕掛品製造取引				塗装済み製品製造取引			
借方	借方	貸方	貸方	借方	借方	貸方	貸方
プレス成形仕掛品	1個	鉄板切削加工仕掛品	1個	塗装済み完成品	1個	プレス成形仕掛品	1個
		銅板切削加工仕掛品	1個			塗料	2Kg
		プレス加工サービス	1時間			塗装サービス	1時間

Table 2: 簿記的表現をした時の取引状況.

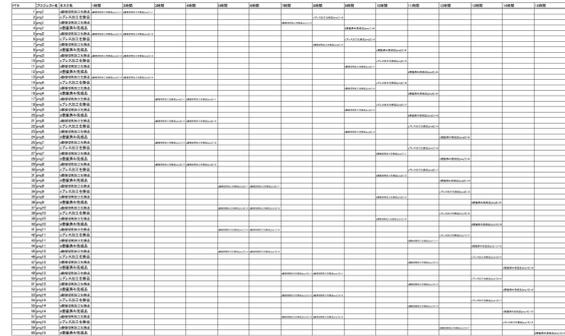


Table 3: 長いタスク優先時のガントチャート.

ビスが消費され、鉄くずが副産物として生産されていることがわかる。また、サービスは時間単位で計測し、そのサービス自体を遂行するのに必要なエネルギーや労働などの資本投入や資本財を利用したサービスの時間制約などの産出関係の取引を記述する。

また、Java ベースのAADL言語⁶⁾を用いると、交換代数として表現された取引の演算や集合論的な記述が容易に行える。したがって、AADL言語により本研究で用いるモデルの各々の取引を統合したコスト原価計算モジュールを実装する。

4 結果

4.1 スケジューリング

完成品を15個製造する複数のプロジェクトでスケジューリングを行った結果のガントチャートをTable 3に示す。これはプロジェクトごとのタスクにどの資源が割り当てられているかを表しており、縦軸にプロジェクトごとのタスク、横軸に時間を表している。製作終了時間は15時間で、並列処理も問題なく行われていたが、鉄板切削加工仕掛品が15個製作されるまで他のタスクは動作していなかった。その原因は、出発点となる鉄板製作加工工程と銅板製作加工工程での職能が同じであり、かつ実行時間が鉄板製作加工工程の方が長かったためである。したがって、今回のプロジェクトでの影響は少ないが、プロジェクトがより煩雑となった場合のスケジューリング問題ではボトルネックが発生する可能性がある。

そこで、着手可能タスク集合の中で同じ職能であるタスクが存在した時、資源の割当を短い時間のタスクを優先とした場合と、ランダムに割り当てる場合のスケジューリングを行った。その結果、どちらも製作終了時間が14時間となった。2つのガントチャートをTable 4, Table 5に示す。短い時間のタスクを優先した方が長い時間のタスクを優先したケースよりも早くなっているのは、逐次処理となっている時間の間隔が、長いタスクと比較して短いためである。したがって、今回のような出発点となるタスクが2つあり、さらに同じ機械装置を使うタスクが存在している場合は、短いタスクを優先した方がより短時間でスケジューリングが可能となることがわかった。また、ランダムで資源がそ

タスク名	開始	終了	優先度	依存関係	リソース	コスト	CO2	汚染物質	サービス
タスク1	0	10	高		1	1000	100	10	10時間
タスク2	0	20	中		2	2000	200	20	20時間
タスク3	10	30	低	タスク1	3	3000	300	30	30時間
タスク4	20	40	高	タスク2	4	4000	400	40	40時間
タスク5	30	50	中	タスク3, 4	5	5000	500	50	50時間
タスク6	40	60	低	タスク5	6	6000	600	60	60時間
タスク7	50	70	高	タスク6	7	7000	700	70	70時間
タスク8	60	80	中	タスク7	8	8000	800	80	80時間
タスク9	70	90	低	タスク8	9	9000	900	90	90時間
タスク10	80	100	高	タスク9	10	10000	1000	100	100時間

Table 4: 短いタスク優先時のガントチャート.

タスク名	開始	終了	優先度	依存関係	リソース	コスト	CO2	汚染物質	サービス
タスク1	0	10	高		1	1000	100	10	10時間
タスク2	0	20	中		2	2000	200	20	20時間
タスク3	10	30	低	タスク1	3	3000	300	30	30時間
タスク4	20	40	高	タスク2	4	4000	400	40	40時間
タスク5	30	50	中	タスク3, 4	5	5000	500	50	50時間
タスク6	40	60	低	タスク5	6	6000	600	60	60時間
タスク7	50	70	高	タスク6	7	7000	700	70	70時間
タスク8	60	80	中	タスク7	8	8000	800	80	80時間
タスク9	70	90	低	タスク8	9	9000	900	90	90時間
タスク10	80	100	高	タスク9	10	10000	1000	100	100時間

Table 5: ランダムに割り当てられる時のガントチャート

それぞれのタスクを割りつけるスケジューリングを行った場合は、プロジェクトの終了のタイミングもランダムとなっているため実用的ではない。こうした観点から資源をランダムに割り付けたスケジューリング問題は、他2つのスケジューリング問題を比較するものとして用いた。

4.2 原価コスト計算

交換代数により代数的に記述したそれぞれのトランザクションを算定し、完成品を15個製造した時の資材を材料情報、環境情報、サービス情報に分けた。この結果をTable 6に示す。材料情報からは完成品の数量および副産物または消費された材料のコストを格納しており、環境情報からはエネルギーやCO2、汚染物質が排出されている量を示している。ここでCO2や汚染物質は負債と同じ項目の材として扱っている。また、サービス情報からは人手による労働時間と、切削装置、プレス加工装置、塗装機の稼働時間が求められている。このことから、時間比例法を適用すると機械装置の総稼働時間数に対する時間数が計算でき、減価償却費の推定ができるようになる。

本研究での原価コスト計算では環境情報とサービス情報の勘定科目は全て貸方に位置づけられているが、これは新たに副産物として生産されるものや資産の増加または負債の減少などが発生しておらず、スケジューリングにおいてコストの消費のみが発生しているからである。したがって、環境情報とサービス情報は全て貸方科目として扱われる。

5 今後の展望

本研究では、簡単な事例となるモデルを用いてスケジューリングを行い、そのスケジューリングの結果に

材料情報					
借方科目	値	単位	貸方科目	値	単位
塗装済み完成品	15	個	鉄材	300	Kg
鉄くず	30	Kg	銅材	120	Kg
鉄くず	75	Kg			

環境情報					
借方科目	値	単位	貸方科目	値	単位
CO2	730.5	Kg	電力	262.5	KWh
			塗料	30	Kg
			地下水	60	L
			汚染物質	0.15	Kg

サービス情報					
借方科目	値	単位	貸方科目	値	単位
			労働サービス	30	時間
			切削装置利用サービス	45	時間
			プレス加工装置利用サービス	15	時間
			塗装機利用サービス	9	時間

Table 6: 原価コスト計算結果の表

合わせた原価コストの生産および消費の管理可能なモジュールを実装した。現段階では価格情報が得られておらず、さらにスケジューリングに紐付いて生産のスケジューリングが正常に行われる域に達していない。今後は価格情報も考慮し、スケジューリング問題と密接に繋がる原価コスト管理可能なモジュール化を検討する。

また、生産計画においてMRPは重要なプロセスであり、BOM(部品表)から各部品の計算を行うことが必要不可欠となる。ここで交換代数を用いれば、BOMの中での材料の投入や時間情報は容易に記述できる。したがって、Table 7に示すように、今後BOMに必要な情報やツリー構造を交換代数により導出していく。

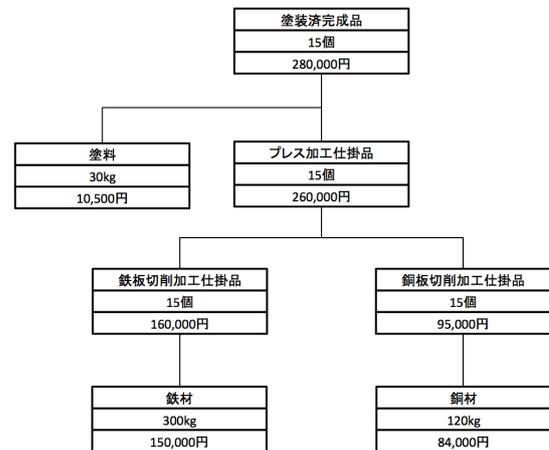


Table 7: 部品表

参考文献

- 1) 名嘉村盛和：ペトリネットに基づくスケジューリング問題へのアプローチ, Fundamentals Review Vol.8(2015)
- 2) 今泉, 森戸：ジョブの分岐と重複生産を許す2工程並列機械フローショップスケジューリング問題, 日本経営工学会 (1999)
- 3) 山田武士, 中野良平：遺伝的局所探索法によるジョブショップスケジューリング問題の解法, 情報処理学会論文誌 (1997)
- 4) 出口, 市川, 石塚, 志手, 染谷, 湯浅: 並列プロジェクト・タスク処理への多能工割付けの動的スケジューリング, Journal of the Inter-national Association of P2M(2011)
- 5) 出口弘：トランザクションベースの経済システム学-リサーチプログラムと方法論-, 進化経済学会 (2013)
- 6) 大貫裕二：国民経済計算推計システム改善のための簡易処理言語 AADL の開発 (2011)