

多層基板製造工場におけるエネルギーコスト最適化のための 生産計画調整シミュレーション

○紺野 剛史, 梅宮 茂良, 吉田 宏章, 竹林 知善 ((株) 富士通研究所)

Shuang Chang, 出口 弘 (東京工業大学)

Production plan adjustment simulation for energy cost optimization in a PCB factory.

* T. Konno, S. Umemiya, H. Yoshida, T. Takebayashi (FUJITSU LABORATORIES LTD.)

S. Chang and H. Deguchi (Tokyo Institute of Technology)

Abstract— Factories have to consider the market conditions with development of a mass customization. Utilization of the multi-agent simulation which can deal with various factors is expected in industry4.0. In this paper, a production plan adjustment simulation for energy cost optimization in a PCB factory was performed. Then producing machines were modeled in a PCB factory. And finally I estimated using a multi-agent simulator of a production plan.

Key Words: S&OP, Multi-Agent Simulator, Production Planning and Scheduling, Energy Cost Reduction

1 はじめに

マスカスタマイゼーションの進展に伴い、工場内の作業員や製造機のみならず市場動向などの外部要因も考慮する必要がでてきた。そのことから、industry4.0時代において、様々な要因を扱うことができるマルチエージェントシミュレーションの活用が期待されている。

製造業の中でも、多層基板製造工場は消費電力の大きい製造機が多数設置されており、製造工程の長さから24時間の稼働を基本としている²⁾。そのため、東日本大震災以降の電気料金値上がりは、エネルギーコストの増加となり、多層基板製造工場にとって深刻な影響を与えている。

本稿では、多層基板製造工場における製造機のモデリングを行い、外部要因として工場全体の電力需要予測を与えた時に、コスト削減（ピーク電力削減）を行うための生産計画調整シミュレーションについて、マルチエージェントシミュレータであるSOARS³⁾を用いた評価結果を報告する。

2 現状の課題と解決策

2.1 製造業における課題

従来の製造業では、利益の最適化をはかるために製造現場の責任者がモノ（台数・量等）ベースの品質（Quality）、価格（Cost）、納期（Delivery）を管理してきた。そのため、工場内のリードタイムを短縮することを目的とした生産ラインのシミュレータなどが活用してきた。

近年では、利益の最適化をはかるため工場内に限定せず、原材料の供給者から最終需要者に至る全過程の個々の業務プロセスを、一つのビジネスプロセスとしてとらえることで、サプライチェーン全体を最適化する戦略に変わりつつある。その中でも、ドイツ政府は2020年に向けた製造業の高度化を目的とした戦略的プ

ロジェクトとしてindustry4.0（ドイツ語ではIndustrie 4.0）を推進している。industry4.0には、ビッグデータを活用したマスカスタマイゼーションへの実現が重要となってくる。マスカスタマイゼーションとは、「大量生産に近い生産性を保ちつつ、個々の顧客のニーズに合う商品やサービスを生み出すこと」と定義されており⁴⁾、更なる多品種少量生産への対応と製造コストの大幅な削減が求められている。

マスカスタマイゼーションに対応し、利益の最適化をはかるためには、経営層と製造現場の合意形成を早め、経営層の迅速な意思決定を行う仕組み作りが重要となる。経営層と製造現場の合意形成を早める方法としてS&OP (Sales and Operations Planning) と呼ばれる、経営層と製造現場の情報を共有し、カネ（金額）ベースを管理することで企業全体を可視化する方法がある。また、消費者の購買意思決定のような複雑な事象をシミュレーションする技術が必要となる。そのことから、サプライチェーン全体を最適化するシミュレータとして、様々な要因を拡張可能で、かつ金額ベースで結果を表示することが可能なエージェント型のシミュレータの活用が期待されている。

しかし、一度に全体最適化を行うことは、膨大なエージェントを設定する必要がありコスト的に実現が難しい。また、複数の組織が含まれる領域をシミュレーションすることも、現場の改善活動を困難にする恐れがある。そのため、まずは組織を超えない範囲で局所最適化を行い、それらを連結することで全体最適化を行う分散シミュレーションのアプローチが有効だと考えた。

2.2 多層基板製造工場における課題

東日本大震災以降の電力量料金単価の値上がりは、エネルギーコストの増加となり、多層基板製造工場にとって深刻な影響を与えている。電気料金は主に契約電力によって変動する基本料金と使用電気量によって変動する電力量料金によって構成される (Fig. 1参照)。

東京電力から提供されている電気料金メニューの1つである業務用季節別時間帯別電力（契約電力500kW以上）によると、基本料金は契約電力を1kW下げることにより年間約2万円、電力量料金は使用電力を1kWh減らすことで約20円の削減となる。

先行研究として、紺野らは、基板実装工場のSMT（Surface Mount Technology）ラインにおいて整数計画法を用いることで生産スケジュール立案し、基本料金や電力量料金を削減する研究を行った⁵⁻⁷⁾。しかし、積層基板工場における研究はされておらず、本稿では、積層基板工場における基本料金削減と電力量料金を削減することを目的とした生産スケジュールの検討を行った。

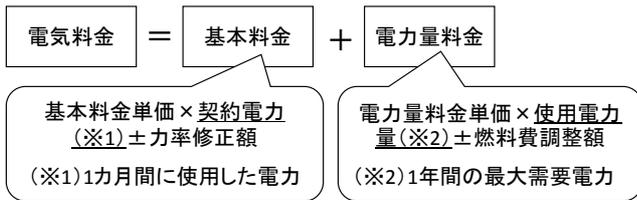


Fig. 1: 電気料金の仕組み

2.3 多層基板製造における工程と製造機

Table. 1に各工程における主な製造機を示す。多層基板製造は、内層工程、積層工程、めっき工程などに代表される複数工程によって構成される⁸⁾。定格消費電力が高い製造機として、内層工程では露光機、積層工程では積層プレス機、めっき工程ではめっき装置などがある。

Table. 1: 製造工程と製造機

工程	製造機
アートワーク工程	-
内層工程	露光機、エッチング機
積層工程	積層プレス機
穴加工工程	NC機（ドリル）
めっき工程	デスミア装置（洗浄）
ソルダーレジスト工程	露光機、乾燥機
検査工程	検査機

工場の基本料金を削減するには、契約電力の削減が必要となる。契約電力は1年間で最も高い30分デマンド（30分間の平均使用電力）が基準となるため、製造機の実行タイミングを調整することで30分デマンドを抑えることが可能となる。また、電力量料金削減には、無駄な消費電力を抑える必要がある。

基本料金削減において、積層プレス機の定格電力が大きく、機器の特性から処理時間の変更が比較的容易であると考えた。電力量料金削減においても、基板の処理枚数を調整することで積層プレス機の実行回数を減らすことが可能だと考え、本研究では積層工程に着目した。

2.4 積層工程における改善案

積層工程は、4つの工程からなる（Fig. 2参照）。積層前処理では、銅との接着力を高めるために、銅表面

に黒色の酸化銅の房状の層を形成する。積層編成では、中間層とプリプレグなどの接着シートを重ね上下に金型を付ける（Fig. 3参照）。積層プレスでは、積層編成が終わった基板を積層プレス機によって真空・加熱することで接着を行う。積層プレス機は、搭載している段数によって同時処理数が変わる。例えば、6段積層プレス機の場合、最大6枚の金型を同時処理可能である（Fig. 4参照）。ただし、同時処理は、基板によって温度プロファイルが異なるために同じ処理プログラムの基板しか扱えない。また、同時処理することで消費電力削減（コスト削減）になるが、基板を待ち合わせする時間が増加するためトレードオフの関係となる。プレス解体では、金型を外して接着した基板を穴加工工程に送る。

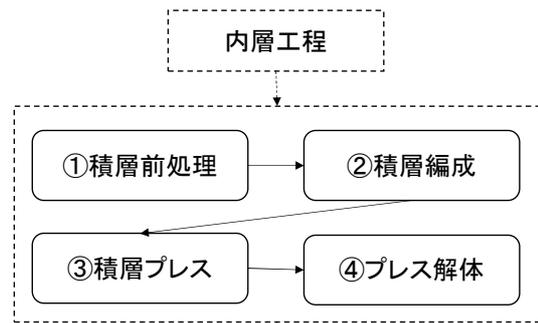


Fig. 2: 積層工程

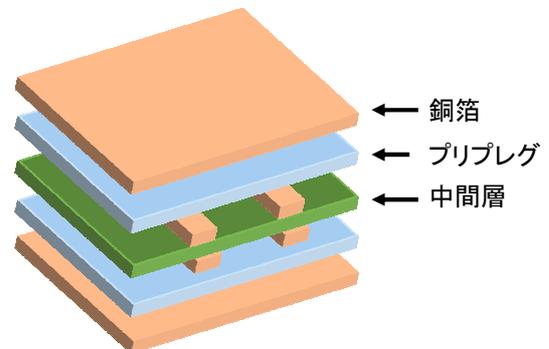


Fig. 3: 多層基板（4層）

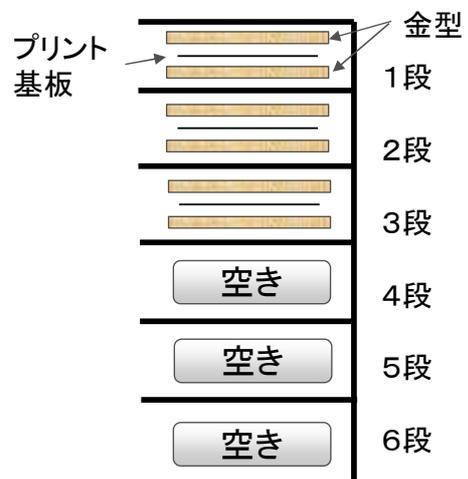


Fig. 4: 積層プレス機 (6段)

Fig.5 に温度の消費電力の関係を示す。積層プレス機によって多層基板を接着する際に、まず余熱を行う。基板投入後、接着シートが溶ける温度まで加熱し、プレス処理を行う。温度や時間は接着シートの材質によって異なる。

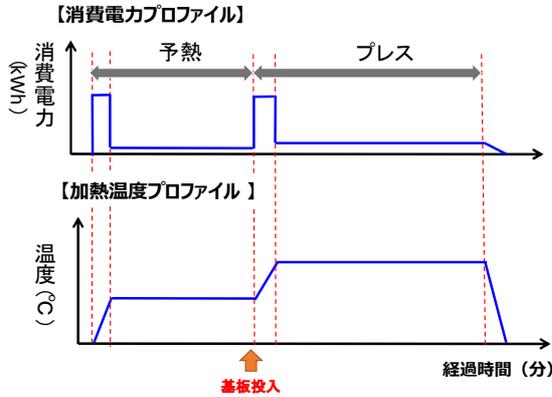


Fig. 5: 温度と消費電力の関係

基本料金削減は、工場全体の電力需要予測を与えた時の積層プレス機の生産スケジュールリングを作成した。また、電力量料金削減は、エネルギーコストと基板を待ち合わせする時間を最小化する生産スケジュールを立案した。

3 基本料金削減

3.1 多層基板の入力情報

実績情報を参考に2015年8月分の入力情報を作成した (Table. 2 参照)。これを用いて以後の評価を行う。

Table. 2: プレス工程の実績情報

プレス投入日時	プレス投入時刻	処理プログラム	金型数	昇温時間
2015/8/1	09:15	100	3	0:30
2015/8/1	09:30	50	6	0:20
2015/8/1	09:45	45	3	0:15
2015/8/1	10:00	100	3	0:30
...

また、事業所全体の消費電力は14時、15時に逼迫する情報を用いた (Fig. 6 参照)。

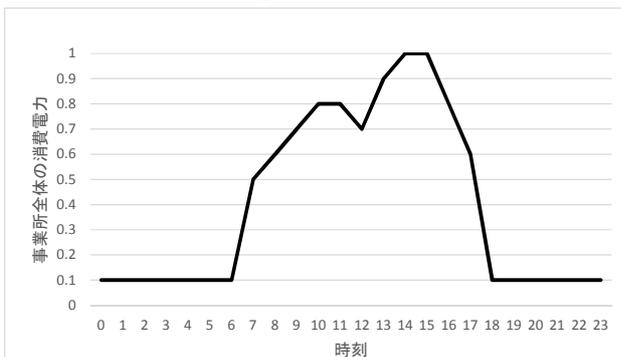


Fig. 6: 事業所全体の消費電力

3.2 問題の定式化

同一並列機械問題で、目的関数を多層基板の生産により積層プレス機が消費する1日の最大電力を最小化する問題として定式化した。

集合

$$\begin{aligned}
 I &: \text{多層基板の集合} & I &= \{1, \dots, k\} \\
 T &: \text{時刻の集合} & T &= \{1, \dots, t_e\} \\
 L &: \text{積層プレス機} & L &= \{1, \dots, m\}
 \end{aligned}$$

定数

$$\begin{aligned}
 n_i &: \text{多層基板 } i \text{ のプレス時間} \\
 w_{it} &: \text{時刻 } t \in T \text{ における需要予測値に多層基板 } i \in I \\
 &\text{ の処理電力をかけた値。ピーク電力のなり易さを意味する} \\
 &\text{ 指標}
 \end{aligned}$$

変数

$$\begin{aligned}
 x_i \in T &: \text{多層基板 } i \text{ の開始時刻} \\
 \delta_{il} \in \{0, 1\} &: \text{多層基板 } i \text{ が積層プレス機 } l \in L \text{ で処理さ} \\
 &\text{ れる場合に } 1 \text{ となる}
 \end{aligned}$$

目的関数

$$\text{minimize } \sum_{i \in I} \sum_{t=x_i}^{x_i+n_i-1} w_{it} \quad (1)$$

制約条件

$$\sum_{l \in L} \delta_{il} = 1 \quad (i \in I) \quad (2)$$

$$x_i + n_i - 1 \leq t_e \quad (i \in I) \quad (3)$$

$$(x_i + n_i)\delta_{il} \leq x_j\delta_{il} \quad \text{または} \quad (x_j + n_j)\delta_{il} \leq x_i\delta_{il} \quad (4) \\
 (\forall i, j \in I, \quad i \neq j, \quad \forall l \in L)$$

式(1)は、1日の最大電力を最小化するための目的関数である。式(2)は、多層基板がいずれかの積層プレス機で処理されることを表す制約式である。式(3)は、作業終了時刻までにすべての作業が終わることを表す制約式である。式(4)は、1台の積層プレス機で同時に2つの多層基板を処理できないことを表す制約式である。

3.3 計算条件

最適化計算ソフトウェアである Gurobi Optimizer 6.5.0 によって計算を行った⁹⁾。計算機環境は CPU が Intel(R) Xeon E5-2637 v2 3.50Ghz (2 プロセッサ), RAM が 256GB である。

3.4 計算結果

多層基板の集合 I は13, 積層プレス機の集合 L は10台. 時刻の集合 T は9:00から18:00の9時間 (30分間隔) とする18とした. Fig. 7に結果を示す. 電力が逼迫する時間帯 (14時から15時) は積層プレス機を極力, 稼働しない生産計画となっている.

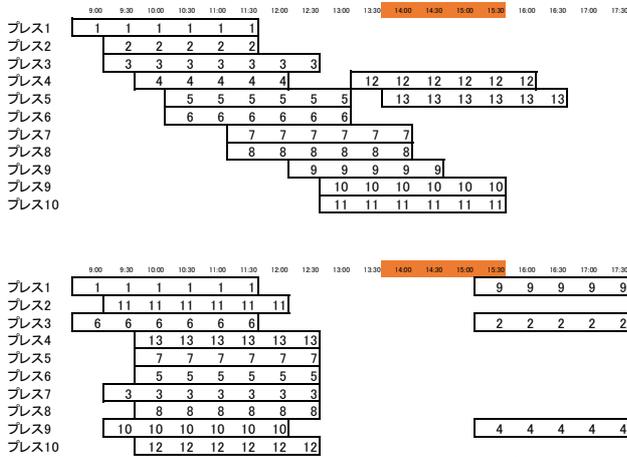


Fig. 7: 計算結果 (上: 最適化前, 下: 最適化後)

3.5 SOARSによるモデル化

SOARS (5.0.6) を使用し, Fig. 8のようなモデルを設定した.

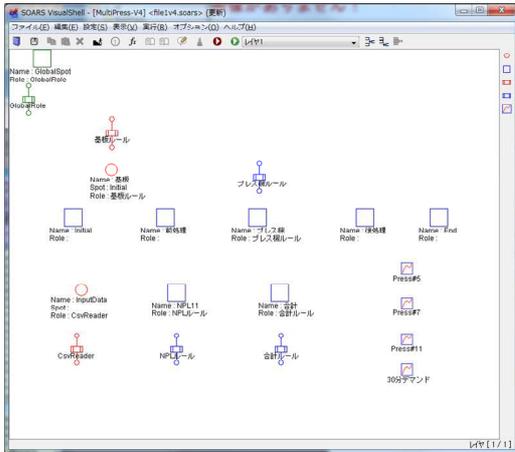


Fig. 8: モデル画面

また, エージェント, スポット, ロールはTable. 3のように設定した.

Table. 3: 設定内容

設定対象	数	設定内容
積層基板	1000	エージェント
プレス機	10	スポット
プレス機投入, 取り出し制御	-	積層基板ロール
プレス工程電力データ	-	プレス機ロール

3.6 SOARSによる検証

SOARSで最適化計算した結果を入力情報として検証を行った. まずは, 実際の積層プレス工程をシミュレーションで稼働できるようにし, その後で最適化前の実績情報と最適化後の生産計画を比較した (Fig. 9 参照).

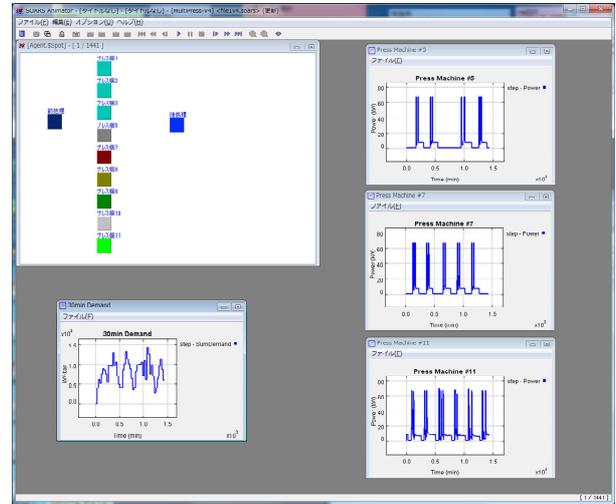


Fig. 9: 実行結果画面

4 電力量料金削減

4.1 最適化の条件

多層基板を積層プレスで同時処理することで消費電力削減 (コスト削減) になるが, 基板を待ち合わせする時間が増加するためトレードオフの関係となる.

本章では, プログラム番号毎に, コストとプレス機の待ち時間という二つの評価指標に基づき最適な処理間隔 (インターバル) te を求める.

プログラム: 233



Fig. 10: プレスの処理間隔

4.2 問題の定式化

定式化を以下に示す.

集合

時刻の集合

$$T = \{t_1, \dots, t_k\}, \forall t_i \in N$$

積層プレス機の集合

$$P = \{p_1, \dots, p_n\}, \forall p_i = \langle te_i, c_i \rangle$$

te_i : 積層プレス機実行間隔

c_i : 積層プレス機実行コスト

多層基板の集合

$$Q = \{q_1, \dots, q_m\}, \forall q_i = \langle t_i, p_i, quan_i \rangle,$$

$$t_i \in T, p_i \in P, \text{ and } quan_i \in N$$

t_i : 基板の到着時間

$quan_i$: 金型数

目的関数

$$\text{minimize } \sum_{p_i \in P} NE_i * C_i$$

NE_i : プログラム番号により各積層プレスの実行回数であり, 実行間隔 te_i と金型数 $\sum q_i, quan_i$ から算出する.

プログラム番号毎に、積層プレス機の実行インターバルの組み合わせ $TE = \langle te_1, \dots, te_n \rangle$ を、1つの金型あたりのコストとプレスの待ち時間を削減するため、Simulated Annealing (焼きなまし法) ¹⁰⁾ による最適化を行った.

4.3 シミュレーション設定

1ヶ月の組込み作業の実績データに基づき、プログラム番号と基板の到達時刻に準じてソートする. 最初の基板の到達時刻を基準(0)とし、以降の基板の到達時刻をその基準との時間差とする (Fig. 11参照). また、プレス機を1回稼働させるには基板の数に関わらず3000円のコストがかかると仮定し計算を行った.

金型No.	組込作業番号	組込組立日割	プログラムNo
6	組込機A	7/27/15.0.27	149
6	組込機A	7/27/15.1.32	149
4	組込機A	7/27/15.4.17	181
1	組込機A	7/27/15.4.21	360
4	組込機A	7/27/15.4.26	181
6	組込機A	7/27/15.4.46	149
6	組込機A	7/27/15.4.57	149
6	組込機A	7/27/15.7.23	46
6	組込機A	7/27/15.7.55	149
1	組込機C	7/27/15.9.17	233
1	組込機C	7/27/15.9.25	232
5	組込機C	7/27/15.9.26	492
5	組込機C	7/27/15.9.28	492
2	組込機C	7/27/15.9.40	36
1	組込機C	7/27/15.10.09	774
4	組込機C	7/27/15.10.92	138
6	組込機C	7/27/15.12.18	138
1	組込機C	7/27/15.12.54	280
1	組込機C	7/27/15.12.56	193
1	組込機C	7/27/15.12.57	195
6	組込機C	7/27/15.12.59	138
4	組込機C	7/27/15.13.04	46
1	組込機C	7/27/15.13.06	490
1	組込機C	7/27/15.13.08	812
4	組込機C	7/27/15.13.09	138
6	組込機C	7/27/15.13.44	182
6	組込機C	7/27/15.13.56	149
6	組込機C	7/27/15.14.39	182
2	組込機C	7/27/15.15.15	361
6	組込機C	7/27/15.15.18	138
6	組込機C	7/27/15.15.53	48
6	組込機C	7/27/15.16.08	492
4	組込機C	7/27/15.16.10	138
6	組込機C	7/27/15.16.37	492



1	金型数	日時(hr)	プログラムNo
17	6	125	43
18	6	134	43
19	6	153	43
20	6	161	43
21	6	161	43
22	4	178	43
23	4	178	43
24	2	187	43
25	4	196	43
26	4	196	43
27	6	211	43
28	6	217	43
29	2	233	43
30	6	0	46
31	4	5	46
32	5	21	46
33	5	21	46
34	5	28	46
35	5	28	46
36	5	30	46
37	6	30	46
38	5	37	46
39	5	37	46
40	6	40	46
41	5	40	46
42	5	44	46

Fig. 11: 入力データ

4.4 最適化結果

SAによってプログラム140のコストと積層プレス機の待ち時間を最適化した te を求めた (Fig. 12参照). SAの初期温度は10000、冷却率は0.0001であり、最終温度を1になるまで繰り返される. Fig. 12から te 値の変化がコストとプレスの待ち時間に大きい影響を与えることが分かる. x軸が実行時間 (分), y軸 (左) が待ち時間 (分), y軸 (右) がコスト (円) となっている.

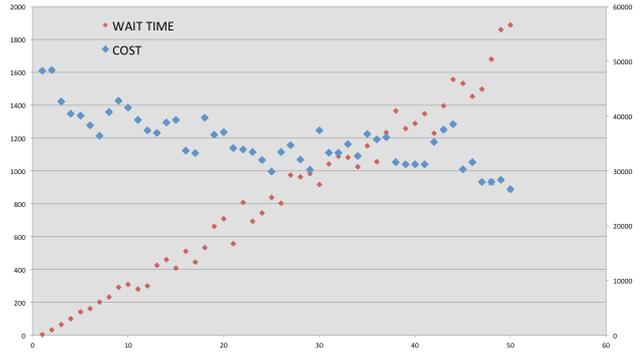


Fig. 12: 実行結果

また、コストと待ち時間という指標に関して双方改善するようなパレート解を Fig. 13 に示す. x 軸がコスト (円), y 軸が待ち時間 (分) となっている.

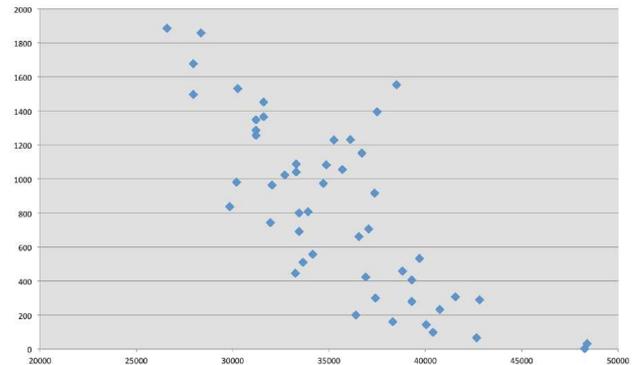


Fig. 13: パレート解

全てのプログラム (25) を考慮する場合、各プログラムのプレス機の待ち時間の組み合わせを Fig. 14 に示す.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	Total Cost	Total wait tim
27	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	x14	x15	x16	x17	x18	x19	x20	x21	x22	x23	x24	x25				
28	45	32	11	31	28	29	47	43	48	30	39	42	21	9	25	2	22	10	50	23	14	25	14	33	20	570800	1096		
29	44	29	30	3	3	38	20	35	9	49	13	35	24	8	22	4	31	50	7	46	9	49	45	49	5	562850	1044		
30	46	10	2	16	38	8	33	13	41	2	17	38	8	7	6	48	44	33	31	33	30	6	26	26	40	564050	971		
31	46	10	2	16	38	8	33	13	41	2	17	38	8	7	6	48	44	33	31	33	30	6	26	26	40	564050	971		
32	46	10	2	16	38	8	33	13	41	2	17	38	8	7	6	48	44	33	31	33	30	6	26	26	40	564050	971		
33	46	10	2	16	38	8	33	13	41	2	17	38	8	7	6	48	44	33	31	33	30	6	26	26	40	564050	971		
34	46	10	2	16	38	8	33	13	41	2	17	38	8	7	6	48	44	33	31	33	30	6	26	26	40	564050	971		
35	46	10	2	16	38	8	33	13	41	2	17	38	8	7	6	48	44	33	31	33	30	6	26	26	40	564050	971		
36	21	22	31	7	30	38	28	23	32	30	49	49	9	22	31	6	12	9	30	29	32	37	46	20	35	571850	1108		
37	44	28	34	39	5	38	21	9	19	20	48	8	50	47	6	40	2	26	14	40	43	14	35	24	15	571050	1044		
92125	11	38	4	25	47	20	13	34	27	49	49	32	47	29	50	49	41	49	2	32	21	9	32	49	17	525600	1151		
92126	11	38	4	25	47	20	13	34	27	49	49	32	47	29	50	49	41	49	2	32	21	9	32	49	17	525600	1151		

Fig. 14: 各プレス機の待ち時間の組み合わせ

5 おわりに

本発表では、生産スケジューラとシミュレータを連携すること経営層と製造現場の合意形成を早め、経営層の迅速な意思決定を行う仕組みである生産計画調整シミュレーション構築の構築について述べ、手始めとして積層プレス工程をマルチエージェントシミュレー

タ (SOARS) を用いてモデリングを行った。また、基本料金と電力量料金のエネルギーコストを削減するための最適化 (定式化) を行い、工場の実績情報を用いて有用性の評価を行った。

今後は、3つの観点で拡張を行って行く予定である。まず、モデリングの拡張として、積層プレス工程以外にも組織を超えない範囲で局所最適化したモデル化を行って行く。将来的には、局所最適化したモデルを連結することでサプライチェーン全体の最適化を行う分散シミュレータをマルチエージェントシミュレータを用いることで実現していきたい。

次に、S&OPの拡張として、事業所の電力需給が逼迫する日を事前に知ることが出来る需要予測システム¹⁾と提案手法を連携することで、基本料金と電力量料金のどちらかを削減することが効率的か経営層にリコメンドする仕組みを構築していきたい。

最後に、最適化の改良として、本稿では電力量料金削減のみ多目的最適化を行ったが、基本料金削減にも適用していきたい。しかし、単に多目的最適化の結果を経営層や製造現場の責任者に提示しても、瞬時に判断することは難しいと感じる。そのため、現場の合意形成を早めるため、最適化とシミュレータの連携を強化し、更なる生産計画調整シミュレーションの検討を進めていきたい (Fig. 15 参照)。

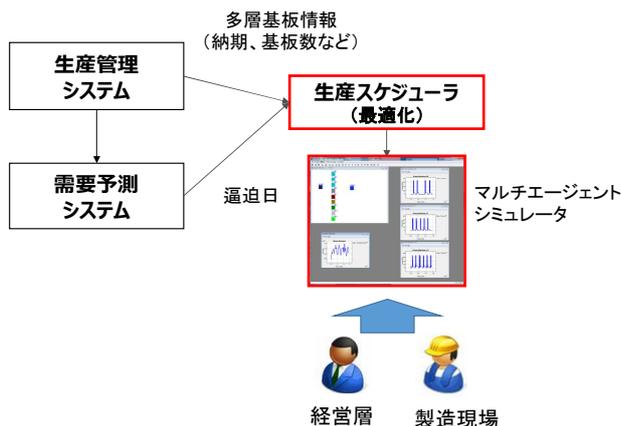


Fig. 15: 生産計画調整シミュレーション

参考文献

- 1) http://www.jsme.or.jp/msd/event/conference2015doc/P009_noritake.pdf
- 2) https://www.oki.com/jp/Home/JIS/Books/KENKAI/n188/pdf/188_R17.pdf
- 3) <http://www.soars.jp/>
- 4) Tseng, M.M.; Jiao, J., Mass Customization, in: Handbook of Industrial Engineering, Technology and Operation Management (3rd ed.), New York, NY: Wiley, (2001)
- 5) 紺野剛史, 岩根秀直, 松本和宏, 吉田宏章, 竹林知善: エネルギーコスト削減を目的としたプリント基板生産スケジューリングの検討, スケジューリング・シンポジウム 2015, 163/165 (2015)
- 6) 紺野剛史, 松本和宏, 岩根秀直, 吉田宏章, 竹林知善: デマンドレスポンスを考慮した生産スケジューリング, 第32回エネルギーシステム・経済・環境

カンファレンス, (2016)

- 7) 紺野剛史, 松本和宏, 岩根秀直, 吉田宏章, 竹林知善: 電気料金型デマンドレスポンスにおける生産スケジューリングの研究, 第3回制御部門マルチシンポジウム, (2016)
- 8) 高木 清: よくわかる プリント配線板のできるまで, 日刊工業新聞社
- 9) Gurobi Optimization Inc. Gurobi Optimizer. Software, <http://www.gurobi.com/>
- 10) S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt and M. P. Vecchi: Optimization by simulated annealing, Science, vol. 220, 671/680 (1983)
- 11) 紺野剛史, 高橋悟, 北島弘伸, 寺西佑太, 園田俊浩: 複数の事業所ビルにおける需要予測手法の評価, 情報処理学会 コンシューマ・デバイス&システム研究会, Vol6, No.5, 1/6 (2013)