

中小製造業での資源制約付きスケジューラー活用方法の提案

～スケジューリング・ドメインシェルの開発～

Proposal of resource-constrained scheduler utilization method in small and medium-sized manufacturing industry ～Scheduling domain shell development～

原 裕淳*¹

Hiroatsu Hara

藤川 裕晃*¹

Hiroaki Fujikawa

*¹法政大学経営大学院イノベーション・マネジメント研究科

Hosei Business School of Innovation Management

要旨: コロナ禍を経験して中小製造業のデジタル化の意識は高まっている。中小製造業の目指す姿は、スマートファクトリーである。スマートファクトリーの観点の「生産活動の見える化」に着目。IoT 技術を活用して現場の情報を収集した際の理想状態を表すスケジューリングに焦点を絞った。経営資源の限られている中小企業でも導入可能な方法を提案。既存の生産管理パッケージを利用。ソルバー (Optseq) を利用した製造業に特化したドメインシェルを作成。2 社の生産プロセスを対象に制約条件をパターン化した。その中の 1 社に対して、実データでの検証を実施。提案した方法により、スケジューラーの作成期間が短縮。計画作成期間も大幅に短縮できた。スケジュール結果も、利用可能なレベルであることを確認した。

キーワード: スマートファクトリー、資源制約付きスケジューリング問題、Optseq

Abstract: After experiencing COVID-19, the awareness of digitalization in small and medium-sized manufacturing industry is increasing. The goal is "Smart Factory". Focus on "visualization of production activities" from the perspective of "Smart Factory". This paper focused on scheduling to represent the ideal state of collecting on-site information using IoT technology. This paper proposes a method that can be introduced even by small and medium-sized enterprises with limited management resources. Use existing production management package. Create a domain shell specialized for the manufacturing industry using Optseq(TM). Constraints were patterned for the production processes of the two companies. Verification with actual data was carried out for one of them. The proposed method shortens the scheduler creation period. The planning period was also significantly shortened. It was confirmed that the schedule result was also available.

Keywords: Smart Factory, Resource Constrained Project Scheduling Problem, Optseq

1. 序論

1.1. 背景

コロナ禍を経験して中小製造業のデジタル化の意識は、高くなっている。中小製造業の生産現場の目指す姿は、スマートファクトリーである。国の方でも、3 種類の補助金（ものづくり補助金、事業再構築補助金、IT 導入補助金）を準備して後押ししている。

（独）情報処理推進機構からは、先行事例の報告書とガイドが発行されている [1]。スマートファクトリーに向けて取り組む観点は、7 つある。本プロジェクトでは、「生産活動の見える化」の観点に着目。先行事例は、IoT 技術を活用して現場の情報を収集している

事例が多かった。スケジューラーを導入して比較している事例はなかった。スケジューラーを導入することで詳細なスケジュール作成が可能になり、より精緻な生産活動の見える化が可能になる。中小製造業でもスケジューラーを導入したいニーズはある。しかし、経営資源も限られており、具体的な導入方法もわからず、大企業に比べて導入が進んでいない状況である。

1.2. 先行研究と目的

スケジューリング問題は、混合整数計画問題 (MIP) に定式化できる。多くの場合は、NP 困難であるので近似解法を用いた解法が一般的であった。最近では、アルゴリズムの進歩により、混合整数計画問

題に定式化して厳密解を求める選択肢 [2] もできた。大企業を中心に特定企業の適用事例について、色々発表されている。中小企業でも適用可能な方法を提案し、有効性を検証することが本論文の目的である。

2. スケジューラーの導入方式

2.1. 導入方式

中小企業のおかれている環境を考慮した導入方式は、図 1 である。中小製造業では、生産管理 PKG を 60% で導入済み、15% でも導入予定の動きがある [3]。既存の生産管理 PKG がある前提で考えた。生産管理 PKG の GUI を利用する。

外付けのスケジューラーは、ソルバーを利用した製造業に特化したドメインシェルとした。計画型エクスパートシステム (ES) 導入時にドメイン定義した ES をドメインシェルと呼称していた。適用分野を固定したスケジューラーも同じ概念である。ソルバーを利用して製造業に特化して簡易の入出力を備えたものを、本論文では「ドメインシェル」と呼ぶ。

スケジューラーの実装方法では、PKG 利用、ソルバー利用などの方法がある。PKG 利用の場合は、ソルバーに比べて導入コストがかかる。また、生産プロセスの制約条件に併せた PKG のカスタマイズが困難であり、ソルバー利用とした。

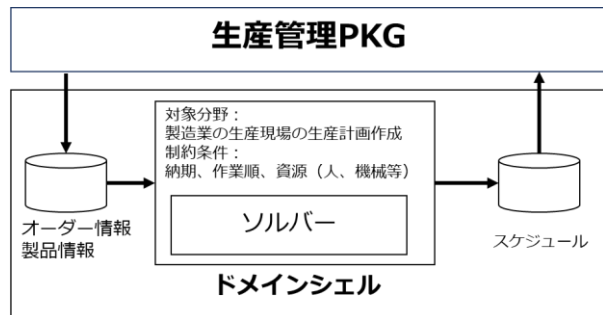


図 1: 導入方式

スケジューラーのソルバーとしては、厳密解用のソルバー、近似解用のソルバーなど様々なものがある。Python から利用可能なものとして表 1 の 4 種類を比較した。

特定の企業でなく複数の中小企業のモデル作成が容易にできる必要がある。また、スケジュール結果は、実行可能解が要求され、必ずしも最適解である必要はない。これらの観点でモデル作成の容易な Optseq [4] を採用した。アルゴリズムは、[5] に詳細が記載されているが、タブー探索を使用している。

表 1: ソルバーの比較表

名称	タイプ	解法	モデル作成	評価
Pulp	オープンソース	厳密解	数式	数理最適化の著名なモジュール
Python-MIP	オープンソース	厳密解	数式	最近では、Pulp より評価高い
Gurobi	商用	厳密解	数式	最速で大規模な問題解ける 数式でのモデル作成難易度高い
Optseq	商用	近似解	個別標記	スケジューリングに特化してモデル作成が容易

2.2. ドメインシェルの構成

図 2 にドメインシェルの概略フローチャートを示す。言語は、Python で記述した。入出力のファイルは、Excel を利用している。スケジュール結果のガントチャートは、python の plotly を使用している。

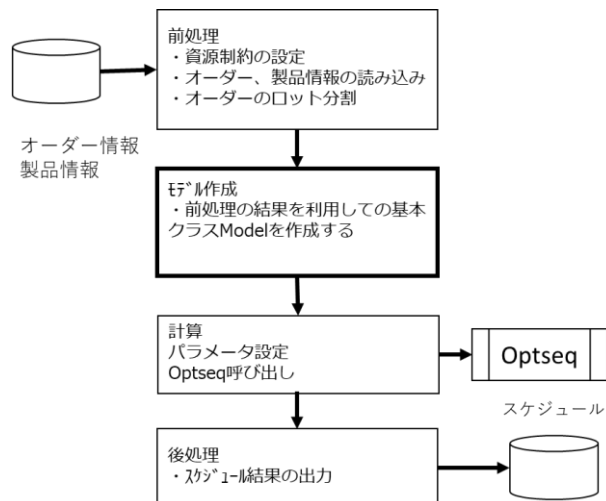


図 2: ドメインシェルの概略フローチャート

概略フローチャートでは、モデル作成部分が重要な処理である。前処理と後処理は、顧客によって修正が必要であるが、枝葉の部分である。計算の部分は、数行。目的関数の種別、計算時間の上限などを設定して呼び出すだけである。

提案したドメインシェルは、中小製造業全てにそのまま利用可能なものではない。制約条件のメンテナンス、入出力部分の改修が必要である。図 2 に示す概略フローチャートは共通で利用可能である。

(1) 目的関数

Optseq に於ける目的関数は、最大完了時刻の最小化と納期ずれの最小化が選択できる。検証では、結果から最大完了時刻の最小化を選択した。

(2) 制約条件

モデル作成で図 3 の基本モデルを用いて表現する。今回は、表 3 の 5 つの制約を表現した。生産プロセスに応じてメンテナンスが必要になる。

図 3 の Activity が、スケジューリングのロットに対応する。Mode は、資源の必要量、ロットの期間などを設定する。複数の Mode が設定できる。Resource は、資源である。人や設備などの資源の供給可能な量を設定する。Temporal は、Activity 間の順序を定義する。(詳細は、[4])

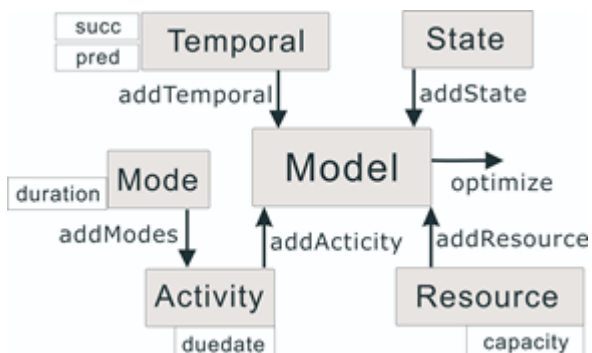


図 3 : Optseq の基本モデル

モデル作成部分をどのようにして効率的に作成するかが、スケジューラーの作成期間に影響する。モデル作成は、IT スキルがあり生産計画の知識がある技術者でなければ作成が難しく、中小企業の担当者が直接作成するには、ハードルが高すぎると思われる。

2.3. プロトタイプ作成

生産プロセスの情報が入手できた表 2 の 2 社に対してプロトタイプを作成した。

表 2 : プロトタイプ作成会社一覧

会社名	事業内容	工程タイプ
小島精工(株)	プレス加工	ジョブショップ
(株)狭山金型製作所	微細金型製造 プラスチック製品	フローショップ

(1) 小島精工(株)

プレス加工の製品では色々な設備が必要になる。製品毎に工程が定義されて、使用する設備が決まっており、複雑に入り組んでいる。図 4 に製品製造時の設備間の関係を示す。1 製品作る際の作業工程数が多く、プロトタイプで提供いただいた情報では、最大 8 工程ある製品もあった。資源は、使用する設備と人に

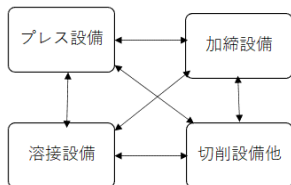


図 4 : 製品製造時の設備間の関係

なる。納期を満足するように、設備と人を割り付けていくことになる。

(2) (株)狭山金型製作所

プラスチック製品の製造工程を、図 5 に示す。工程の流れは、一方向である。特徴的なのは、成形工程で製品が切り替わる段取り時間が、材料の変化に伴って変化する点である。順序依存の段取り時間を考慮する必要がある。検査工程は、複数名で作業しているが分担して並列で作業が可能である。

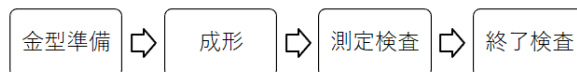


図 5 : プラスチック製品の製造工程

2.4. 制約条件のパターン

生産プロセスの特徴から制約条件を 5 パターンに分類した。会社と制約条件の対応を表 3 に示す。

表 3 : 会社と制約条件の対応

	順序制約	占有資源制約	工程間占有制約	順序依存段取り時間	並列ジョブ
小島	○	○			
狭山	○	○	○	○	○

制約条件単位に制約条件の意味と図 3 の基本モデルでの記載方法を簡単に説明する。

(1) 順序制約

ロットの前後関係を記載する制約である。すべての会社で製品を製造する際の作業順が定義されていた。基本的な制約で Temporal で前後関係の制約の記載が可能である。

(2) 占有資源制約

資源をロットの作業期間中に占有する制約である。資源としては、設備、人などがある。作業期間中に資源を占有するのが、普通であり基本的な制約となる。

資源の供給上限と利用可能な期間を Resource で定義する。Activity と紐づく Mode に対して Resource の必要量を定義。Resource を結びつけることで記載が可能である。

(3) 工程間占有制約

製品を製造するロットが資源の問題で連続して製造する場合に、工程間で空き時間が生じる場合がある。空き時間でも資源を占有している制約である。狭山金型製作所でプラスチック製品を製造する際の金型が該当する。工程間で空き時間がある場合でも金型の資源は占有されている。モデル上は、ダミーの Activity を

¹ Optseq のマニュアル : <https://scmopt.github.io/manual/07optseq.html>

定義して資源占有制約を記載する。本来の Activity と
ダミーの Activity 間の順序制約の記載も必要である。

(4) 順序依存段取時間

段取り時間が一定ではなく、順序に依存する制約で
ある。狭山金型製作所の成形機では、製品が切り替わ
る際に、材料が同じかどうかで段取り時間が異なっ
ている。モデル上は、順序を意識した段取り Mode を準
備する。段取り Mode に設定される時間は、材料を判
断した時間になっている。段取りの Activity に対して
複数の段取り Mode を紐付ける。アルゴリズム上は、
段取りの Activity に対して、より最適な段取り Mode
を探索する。

(5) 並列ジョブショップ

複数の資源で並列して作業ができる制約である。狭
山金型製作所の終了検査では、複数名で作業してい
る。1名で作業も可能であるが、複数名で作業した方
が短時間で終了できる。このような場合が該当する。

Model 上は、Activity に紐づく Mode を可能な組み
合わせ数分準備する。Mode 毎に、期間と使用する資
源（人）が異なる。Mode を選択することで最適な人
数が求まる。

2.5. 進捗状況考慮した再実行

実際のスケジューリングでは、最初に計画作成した
後で進捗状況を考慮して再度計画作成する必要があ
る。作業開始済みの情報を Excel ファイルから読み込
み、時間制約で開始時刻を固定する方法でプロトタイ
プを作成した。図 6 に再実行した結果を示す。赤線
以降を再スケジューリングしている。

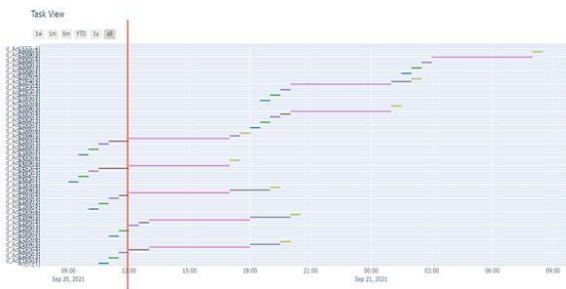


図 6：プロトタイプでの再実行結果

時間が経過して固定するロットが増えてくると実行
可能なスケジュールを探索できない可能性もある。実
際の現場では、1日1回はオーダー情報を新規に取り
込み、その後の1日の中での再実行では、ロットを固
定して計画作成する想定である。

3. 検証

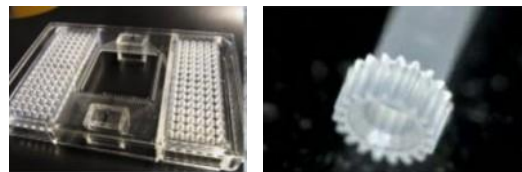
狭山金型製作所の 2021 年 11 月時点の実データを用
いて検証を行った。

3.1. 検証先の概要

企業概要

名称	株式会社 狭山金型製作所
場所	埼玉県入間市宮寺
資本金	1,000 万円
従業員	36 名

半導体・自動車・医療機器・コネクタなどの超微
細・超精密金型の製造とそれらを利用したプラスチ
ック製品の製造を行っている。図 7 に製品の一部を
示す。左側は、医療機器で血液検査に使用するマイ
クロ流路である。右側は、直径 0.5mm の微細なギ
アである。



マイクロ流路 検査血液用 φ0.5 モジュール0.025
マイクロギア

図 7：プラスチック製品の一部

3.2. 現在のスケジュール作成方法

生産管理パッケージは、TECHS²を利用している。
計画作成は、図 8 に示すように3段階に分けて手
作業で作成している。出荷予定表は、生産プロセス全
体に関係する予定表で毎日更新されている。

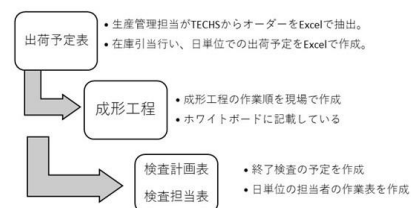


図 8：現状のスケジュール作成方法

成形工程は、現場にて作成している。予定表を受け
てその日の成形機での作業予定をホワイトボードに記
載している。

検査計画表は、終了検査の計画表である。週末に翌
週分を作成して日々見直しを行う。検査担当表は、
日々の担当者の作業を示している。手書きで作成さ
れている。スケジュール作成であるが、新規に作成す
る場合、トータルで3日程度かかっている。この部分
を計算機でスケジューリングする検証である。

² 株式会社 テクノア HP: <https://www.techs-s.com/>

3.3. スケジューラーの構成

図 9 にスケジューラーの構成を示す。既存の生産管理パッケージにドメインシェルを外付けする構成である。検証では、既存の生産管理 PKG の改修が必要なため、スケジュール結果の確認までで、既存の生産管理 PKG に書き込む部分は作成していない。

スケジュール作成に際して、制約条件の複雑さから 2 段階に分けて作成した。2 段階に分けた最大の理由は、成形機 No が複数選択可能であり、ロットの製造順によって段取り時間が異なるのですべての組み合わせを考慮するのは、探索する範囲が膨大になるためである。同じ製品のロット間では、段取り時間は不要であるが、異なる製品のロット間では、段取り時間が発生する。さらに、材料が同じ場合と違う場合で異なる。

ステップ 1 では、金型準備、成形工程に対してスケジューリングを実施。結果を確認して、各製品の成形機 No を決定する。ステップ 2 では、全工程に対してスケジューリングを実施する。

生産プロセスの制約条件の複雑度に応じて、スケジューラーの構成の変更ができる自由度があるのもソルバーを利用したドメインシェルの強みである。

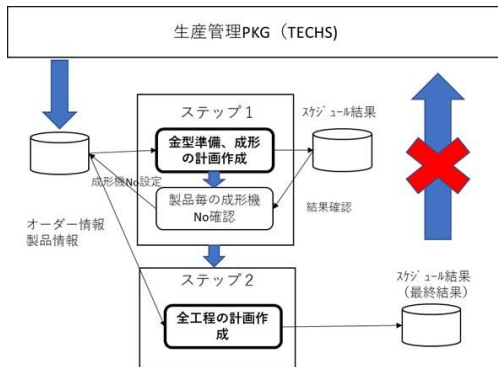


図 9 : スケジューラーの構成

3.4. ステップ 1: 成形機 No の決定

ステップ 1 では、金型準備と成形の工程のスケジューリングを行う。成形機の段取り時間は、固定にしている。問題の概要を、表 4 に示す。

表 4 : 問題の概要 (ステップ 1)

目的関数	最大完了時刻最小
制約条件	<ul style="list-style-type: none"> 各オーダーの納期 (必須でない) 作業順制約 金型準備のロット後に成形機のロットが複数紐づく 金型準備 人の制約 (昼間のみ) 成形機 製品情報の成形機情報 (複数台の中から適切な1台選択する) 段取り替えの人の制約 (昼間のみ) 成形作業は、24H可能 段取り時間は、固定

ステップ 1 の黒枠部分のスケジュールの計算時間は、表 5 のようになった。

製品のオーダー数 49。割付ロット数 148。オーダーに対して、工程分割、ロット分割しているのでロット数は多くなっている。

スケジュール結果で割り付けられた成形機 No を確認。最大完了時刻を遅らせても、納期的に余裕があるので作業効率を考えて 2 ロットの成形機 No を修正した。

表 5 : 計算時間 (ステップ 1)

計算時間 : 8.52 秒
OS : Windows10 Pro
PC : Vostro 3500 (Dell ノートパソコン)

3.5. ステップ 2: 詳細計画作成

ステップ 2 では、全工程についてのスケジュールを作成する。製品で使用する成形機 No を固定にしている。それ以外は、すべての制約を考慮している。表 6 に問題の概要を示す。問題の規模は、オーダー数 49、割付ロット数 493。オーダーは、ステップ 1 と同じであるが、工程が増えておりロット数は多くなっている。

表 6 : 問題の概要 (ステップ 2)

目的関数	最大完了時刻最小
制約条件	<ul style="list-style-type: none"> 各オーダーの納期 (必須でない) 作業順制約 金型準備のロット後に成形機のロットが複数紐づく 金型準備 人の制約 (昼間のみ) 成形機 段取り替えの人の制約 (昼間のみ) 成形作業は、24H可能 段取り時間は、前後の材料によって異なる 測定検査 人の制約 (昼間のみ) ロット毎の抜き取り検査。 終了検査 人の制約 (昼間のみ) 並行作業が可能。負荷状況、納期を考慮してロット単位で作業人員決定

ステップ 2 の計算時間は、22.57 秒であった。スケジュール結果の詳細は、Excel で出力している。図 10 は、一部を抜粋したものである。

ロット名	品番	品名	開始時刻	終了時刻	工程名	人	機
S-52001_sskk140			2021-11-04 09:00:00	2021-11-04 11:00:00	検査検査		1
S-52001_sskk140			2021-11-04 11:00:00	2021-11-04 20:30:00	machinex		1
S-512027_sskk111			2021-11-05 09:00:00	2021-11-05 11:00:00	検査検査		1
S-52007_sskk111			2021-11-05 11:00:00	2021-11-05 09:00:00	machinex		1
S-52004_sskk115			2021-11-08 09:00:00	2021-11-08 11:00:00	検査検査		1
S-52004_sskk115			2021-11-08 11:00:00	2021-11-08 18:00:00	machinex		1
S-52008_sskk118			2021-11-09 09:00:00	2021-11-09 11:00:00	検査検査		1
S-52008_sskk118			2021-11-09 11:00:00	2021-11-09 14:30:00	machinex		1
S-512036_sskk130			2021-11-10 14:30:00	2021-11-10 17:00:00	検査検査		1
S-512036_sskk130			2021-11-10 17:00:00	2021-11-11 01:00:00	machinex		1
S-512034_sskk149			2021-11-11 11:00:00	2021-11-12 05:00:00	machinex		1
S-52005_sskk150			2021-11-15 19:00:00	2021-11-16 18:00:00	終了作業	2	2021-11-17 17:00:00
S-512038_sskk167			2021-11-16 00:00:00	2021-11-16 11:00:00	終了作業	1	2021-11-17 17:00:00
S-512005_sskk174			2021-11-17 09:00:00	2021-11-17 11:00:00	終了作業	5	2021-12-21 17:00:00
S-52005_sskk180			2021-11-17 11:00:00	2021-11-17 15:30:00	終了作業	5	2021-11-17 17:00:00
S-512004_sskk180			2021-11-17 11:00:00	2021-11-17 11:00:00	終了作業	1	2021-12-21 17:00:00
S-512038_sskk185			2021-11-18 09:00:00	2021-11-18 15:00:00	終了作業	2	2021-11-17 17:00:00 納期遅延
S-52007_sskk187			2021-11-18 15:00:00	2021-11-18 11:00:00	終了作業	1	2021-11-18 17:00:00 納期遅延
S-52005_sskk194			2021-11-18 15:00:00	2021-11-18 16:00:00	終了作業	2	2021-11-17 17:00:00 納期遅延
S-52005_sskk195			2021-11-18 15:00:00	2021-11-18 15:30:00	終了作業	1	2021-11-09 17:00:00 納期遅延

図 10 : スケジュール詳細結果 (一部抜粋)

スケジュール結果では、検査工程に必要な人数しか決めていないので検査担当表は従来同様に作成する必要はある。俯瞰的な確認は、図 11 と図 12 で実施可能であるが、現場に必要なのは図 10 である。顧客の要望に合わせた修正が必要になる。

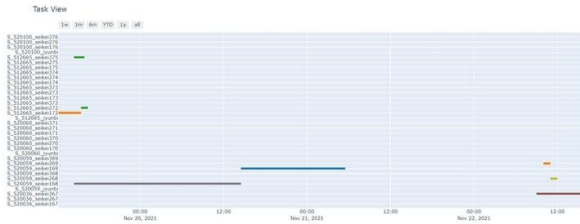


図 11：ガントチャート（一部抜粋）

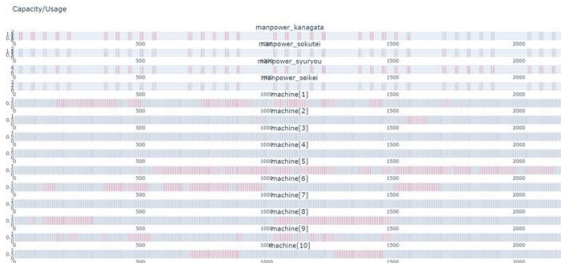


図 12：資源の使用状況

3.6. 考察

検証結果について考察した結果は以下である。

3.6.1. 効果

(1) スケジューラー作成期間短縮

検証用のスケジューラー作成期間であるが、1週間程度かかった。インデント部分で作業量が多かったのは、オーダーのロット分割作業である。現場作業はロット単位であったため分割が必要だった。次は、2ステップに分けた部分である。トータルでみると、ドメインシェルにしていたので作成期間は短縮できた。

(2) 大幅な計画作成時間短縮

実際の規模（オーダー数 49）に対して計画作成実施。現状 3 日かかっている計画作成が、実用可能な時間（約 30 秒：8.53 秒(ステップ 1)、22.57 秒(ステップ 2)で解くことができた。成形機 No の確定や「検査担当表」の作成が必要であるが、数時間で作成可能であり大幅に効率化できた。

(3) スケジュール結果

顧客の生産管理担当の評価は、制約条件を満足しており初期計画として利用可能との評価だった。

3.6.2. 課題

(1) 製品情報の整備

製品情報が最初から全て揃っていたわけではなかった。オーダー情報を抽出した後で、製品情報の紐づけを行い、整備できていないデータは、作成してもらった。現場から見ると、製品情報の整備が取り組むべき最初の課題になる。

(2) 計画変更への対応

現場では、頻りに計画変更発生している。実際に適用していくには、朝一番と午後一番でその時点の

進捗状況を反映して修正していく必要があるとのことだった。プロトタイプで進捗状況を取り込んだケースも想定していたが予想通りだった。

(3) 解が求まらない場合の対応

資源制約付きスケジューリング問題では、資源制約を満たす解がないと実行可能解が出力されない。プロトタイプ作成時でも、解が求まらないケースは多数あった。ソルバー側で緩和条件の提示が必要である。今後の研究課題である。

(4) 制約条件のメンテナンス

ドメインシェルの制約条件のメンテナンスが必要である。事例を積み重ねて絶えずブラッシュアップしていく必要がある。

4. 結論

中小製造業にスケジューラーを導入するためには、図 1 の方式が有効である。ドメインシェルを利用することで、ソルバー単独で導入する際の障壁を下げている。

実際には、図 2 の制約条件のメンテナンス、入出力部分の改修などが必要であり、中小企業が単独で導入するには難易度が少し高い。今回プロトタイプを作成したようなサービスが必要である。プロトタイプで有効性を確認したうえで本番導入する方式になる。国の補助金活用含めて支援していき、中小製造業のスマートファクトリー実現を支援していきたい。

謝辞

Optseq でのモデル作成で色々ご助言いただいた法政大学デザイン工学部システムデザイン学科野々部宏司教授に感謝申し上げます。プロトタイプ作成、検証にご協力いただいた（株）狭山金型製作所様、小島精工（株）様に感謝申し上げます

参考文献

- [1] (独) 情報処理推進機構, “中小規模製造業の製造分野におけるデジタルトランスフォーメーション(DX)のための事例調査報告書,” (独) 情報処理推進機構, 2020 年.
- [2] Takeshi D. Itoh, Takaaki Horinouchi, Hiroki Uchida, Koichi Takahashi, Haruka Ozaki, “Optimal scheduling for laboratory automation of life science experiments with time,” SLAS Technology, 2021.
- [3] 中小企業庁, “中小企業白書 2021 年版,” 中小企業庁, 2021.
- [4] 久保幹雄, 小林和博, 斉藤藤, 並木誠, 橋本英樹, Python 言語によるビジネスアナリティクス, 第 14 章, 近代科学社, 2016.
- [5] K. Nonobe and T. Ibaraki, “A tabu search algorithm for a generalized resource constrained project scheduling problem,” Proceedings of the Fifth Metaheuristics International Conference (MIC2003), pp. 55/1-6, 2003.