

(技術資料)

## 高砂機械工場新日程計画・物流管理システム

### Development of New Production Scheduling and Logistics System for Takasago Machinery Plant



井筒理人\*1  
Rihito IZUTSU



梅田豊裕\*2  
Toyohiro UMEDA



池田英生\*2  
Hideo IKEDA



大西幸博\*3  
Yukihiro ONISHI



森崎竜介\*3  
Ryusuke MORISAKI

For the machinery plant of the make-to-order (MOT) type Machinery Center in the Takasago Works of Kobe Steel, a system for scheduling and logistics management has been developed to improve the product assortment rate, an index for the rate of on-time delivery to the subsequent assembly plant. For scheduling, a method was devised for estimating excessive overloading to support the determination of the amount to be outsourced. For the logistics, a mechanism was established to collect progress data and the locations of members with RFID, the information necessary for preparing schedules. The introduction of this system has improved the assortment rate by approximately 20% compared with the value normalized by the average assortment rate before the introduction of the system.

まえがき = 当社機械事業部門では、高砂製作所において圧縮機（レシプロ、ターボ、スクリュ）、樹脂混錬機、ゴム混錬機などの機械装置を一品生産している。内作の加工部品は製作所内の加工工場にて加工し、外部の購入品と合わせて組立工場で最終製品の組み立てを行っている。組み立ての生産性向上においては、組立工程の開始予定日に必要な部品が組立工程に揃（そろ）っていることが最重要である。その達成度合いである「荷揃率」を向上させるためには、加工工場のリソースである設備と作業者を十分に活用するいっぽうで、過負荷な状況に対しては、事前に必要最小限の作業量を外注化することにより加工工場の負荷調整を行うことが必要となる。

しかしながら、加工工場は一品一様の部品を加工する大規模なジョブショップ型の工場であり、従来、複数人の計画立案者をもってしても全5万作業の日程計画は作成できず、工場全体を考慮した現場への作業指示ができなかった。このように、大規模工場であるが故に、加工計画を立案できていた設備が限定されていた。このため、生産管理に必要な半年程度先の負荷状況を精度良く見積もることが困難であり、適切な外注化判断や残業対応による負荷調整ができなかった。また、工場内の大量の部材の位置管理ができなかったことから計画と同期した搬送が困難であり、荷揃率向上が課題となっていた。

ジョブショップ型の工場におけるスケジューリング問題を対象とする手法はさまざまな研究があり、納期重視型の問題に対してはシミュレーションベースの手法が提案されている<sup>1)</sup>。また、納期遅れを防ぐための残業調整を行うシミュレーションベースの手法も提案されてい

る<sup>2), 3)</sup>。さらに、納期を厳守するための残業時間を遺伝的アルゴリズムによって推定する手法も提案されている<sup>4)</sup>。

しかしながら報告例<sup>2)~4)</sup>はいずれも、社内作業者の残業時間による調整であり、外注の利用は想定していない。また、外注ではなく、必要な社内設備の増強を推測する手法については、単位期間ごとの負荷を計算するタイムバケット手法が提案されている<sup>5)</sup>。しかしながら、タイムバケットであるが故に作業時刻まで決定することはできず、その精度は粗くなることから適切な負荷調整が困難である。

そこで当社では、ジョブショップ型の工場において納期を厳守するために必要な外注量を推定する問題に対して、高速に計算可能なシミュレーションベースの手法を提案し、それを利用した日程計画システムを構築した。また、計画立案に必要な進捗情報と、計画と同期化した搬送に必要な部材位置を収集する物流管理システム（Innovation of Logistics and Intelligent Scheduling System, 以下iLissという）を開発した。本稿ではそれらのシステムの概要を説明する。

#### 1. システム構成

図1に示すように、開発したシステムは日程計画システム（以下、iLiss-Sという）および物流管理システム（以下、iLiss-Lという）から構成されている。日程計画システムは、中長期計画（1箇月先以降）と短期計画（現在～1箇月先）を立案する。それぞれの計画は、利用の仕方と立案方法が異なる。すなわち、短期計画は現場作業員への作業順序の指示に利用し、中長期計画は外注化

\*1 技術開発本部 生産システム研究所（現 技術開発本部 AI推進プロジェクト部） \*2 技術開発本部 生産システム研究所 \*3 機械事業部門 機械センター 高砂加工部

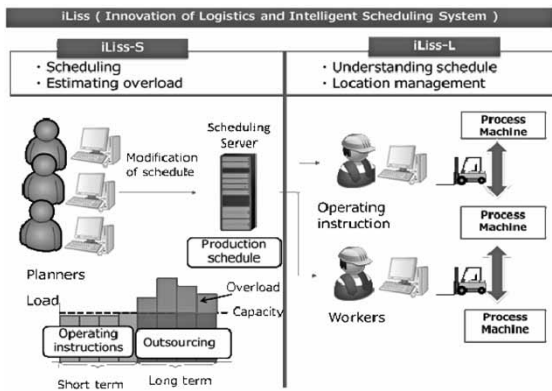


図1 開発した日程計画システムおよび物流管理システムの概要  
Fig. 1 Outline of developed scheduling system and logistics system

判断に利用する。物流管理システムは、現場に設置したPCによって日程計画の確認や進捗入力ができるようにするとともに、RFID (Radio Frequency IDentification) を利用して計画と同期した搬送の実現に必要な部材の位置管理を行う。

次章以降では、日程計画システムおよび物流管理システムそれぞれの機能について説明する。

## 2. 日程計画システム

日程計画システムは計画立案方法としてフォワードスケジューリングを採用しており、短期計画と中長期計画とで細部は異なる。

中長期計画は外注化判断のための超過負荷の把握が目的である。このため、納期制約を順守し、必要に応じて設備能力制約や作業能力制約を緩和した計画を立案する。設備選択および作業員選択は、マスタ上利用可能なものの中から最短で割り付けられるものを選択する。ディスプレイパッチングルールは納期遅れ削減に有効なSLACK<sup>6)</sup>を用いている。SLACKは、納期から残りの作業時間を引いた時間(余裕時間)が少ない作業から順に割り付けていく方法である。詳細は2.1節で述べる。

短期計画は、現場への作業指示が目的であるため、設備能力制約および作業員能力制約を順守した実行可能な計画を立案する。設備選択および作業員選択はリスケジューリング前と同一のものを選択し、ディスプレイパッチングルールはリスケジューリング前の前計画の開始時刻の早い順としている。表1に短期計画および中長期計画の立案方法を示す。

### 2.1 中長期計画の計画アルゴリズム

中長期計画の計画アルゴリズムは以下のとおりである。

Step 1 : [作業選択]

未割り付けで、かつ前作業が割り付け済みの作業の中

から、納期から残りの作業時間を引いた余裕時間の最も少ない作業を選択する。例えば、あるJobが第1～第3工程の作業を経て加工される場合を考える。第1工程まで割り付け済みの場合、この第2工程の余裕時間は以下のように計算される。

$$d - \text{now} - \sum_{i=2}^3 T_i \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $d$ はJobの納期、 $\text{now}$ は第1工程の終了時刻、 $T_i$ は第*i*工程の作業時間である。

Step 2 : [作業の仮割り付け]

選択した作業を、設備能力制約および作業員能力制約内で仮割り付けする。ここで、設備は利用可能な中から最も早く割り付けられるものを選択する。作業員は、利用できる設備数が最も少ない人を選択する。

Step 3 : [作業の割り付け]

仮割り付けした作業の終了時刻が最遅終了時刻を超えない場合は、仮割り付けをそのまま確定割り付けとする。最遅終了時刻を超える場合は、当該作業のJob内の前作業の直後に超過作業として割り付けする。ここで、最遅終了時刻とは、この時刻より遅れて終了すると後の工程を最短で割り付けたとしても必ず納期遅れになってしまう時刻のことをいう。例えば、Step 1で説明したJobの第1工程の最遅終了時刻は以下のとおりである。

$$d - \sum_{i=2}^3 T_i \dots\dots\dots (2)$$

[Repeat]

全ての作業が割り付けられるまで上記のStep 1～Step 3を繰り返す。

図2にアルゴリズムのイメージを示す。超過作業として割り付けることによって納期を制約として必要に応じて設備能力の制約を緩和するため、中長期計画は必ず納期を順守した計画となっている。計画立案者は、超過作業に着目することによって超過作業の外注化、あるいは作業員の残業などの計画修正を行うことができる。

### 2.2 短期計画の計画アルゴリズム

短期計画の具体的な計画アルゴリズムは以下のとおりである。

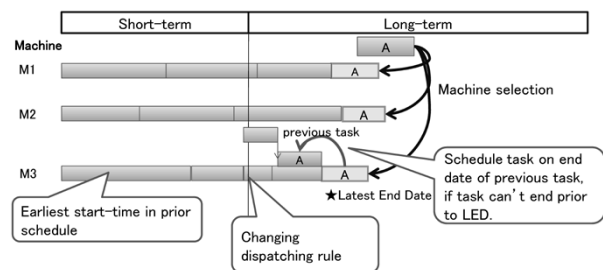


図2 超過作業の計画方法  
Fig. 2 Scheduling method for overload task

表1 短期計画および中長期計画の立案方法  
Table 1 Scheduling method of short, medium- and long-term plans

Term	Purpose	Restriction	Dispatching rule	Machine selection	Worker selection
Short	Operating instructions	Machine and worker capacity	Earliest start-time in prior schedule	Fixed	Fixed
Long	Making decision on outsourcing	Machine and worker capacity (Relaxing restriction if needed) On-time delivery	SLACK	Select machine so that a task can start earliest.	Select worker with smallest number of available machines.

### Step 1 : [作業選択]

未割り付けで、かつ前作業が割り付け済みの作業の中から、リスケジューリング前の開始時刻が最も早い作業を選択する。

### Step 2 : [作業の割り付け]

選択した作業を、設備能力制約および作業能力制約内で割り付ける。ここで、設備はリスケジューリング前と同じものにする。作業者は、利用できる設備数が最も少ない人を選択する。

Step 1 の作業選択において、リスケジューリング前の開始時刻が最も早い作業から順に選択することから、リスケジューリング前後での計画の変化が抑えられる。例えば、翌日に計画していた作業がリスケジューリング後に突然自動で1週間先になるといったことを防ぐことができる。このため、現場の混乱を抑えられる。

[Repeat]

全ての作業が割り付けられるまで上記のStep 1 ~ Step 2 を繰り返す。

## 2.3 計画修正の必要性

前述のとおり、中長期計画は納期に基づいた余裕時間を優先順として割り付している。また、中長期に計画された作業は、時間を経て短期計画に計画されることになるため、前回計画の開始時刻を優先順としている短期計画も間接的に余裕時間を優先順とした割り付になっている。そのような余裕時間を優先順とするだけでは下記のような場合は不十分であり、計画立案者の判断で計画を修正する必要が生ずる。

- ・同種の作業を連続させることで作業が効率化できる場合がある。このため、同種作業であることを計画立案者が判断し、それらの作業を連続させる修正が発生する。
- ・短期計画においては、計画と進捗のずれから発生する設備の非稼働時間を少なくするために設備変更や作業順の修正が発生する。その際に計画ロジックで自動的に設備の変更や作業順を修正すると現場が混乱する。

いっぽう、中長期計画は1箇月以上先の計画であるため、リスケジューリング後に計画が自動的に変動しても現場は混乱しない。そのため、進捗のずれに応じて計画ロジックが余裕時間を考慮してリスケジューリングすれば、設備変更や作業順序を計画立案者の判断で変更する必要はなく、超過作業をどの加工ベンダに外注化するか決定すれば良い。

## 2.4 修正後のリスケジューリングの動作

工場では計画立案者が複数いるため、複数人が同時に計画修正できる機能を開発した。主に修正する点は、設備内の作業順と作業で使用する設備の変更であり、短期計画と中長期計画では、次のとおり修正可能な点が異なる。

- ・短期計画は作業順変更と設備変更が可能である。
- ・中長期計画は計画ロジック内で設備選択を行うが、計画立案者が希望する場合には設備を固定することができる。また、超過作業は外注先を選択して固定

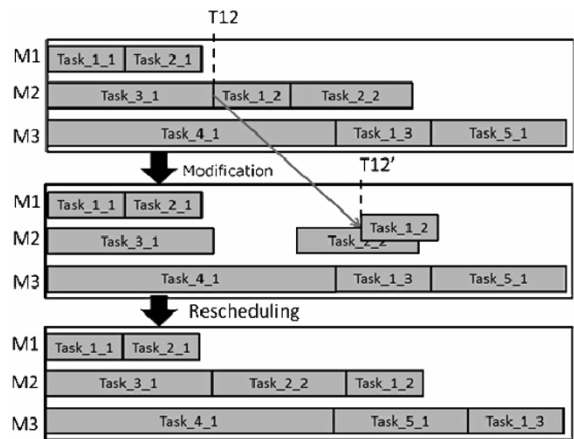


図3 修正後のリスケジューリング  
Fig. 3 Rescheduling after modification

することができる。設備内の作業順を変更したとしても余裕時間を優先度として計画される。

計画立案者による計画の修正は、ガントチャートから編集権を取得した作業に対してのみ修正が可能となる。すなわち、他の計画立案者が編集権を取得している作業に対しては、当該作業の編集権を取得することができないため、同一の作業に対して複数人が同時に修正することはできない。

図3の例を用いて修正後のリスケジューリング動作を説明する。上部分のガントチャートはリスケジューリング前、中部分修正直後、下部分がリスケジューリング後である。ここで、Task\_K\_NはJob番号KのN工程を意味し、TKNはTask\_K\_Nの開始時刻を示している。中部分のリスケジューリング前では、Task\_1\_2の編集権を取得し、その開始時刻をT12からT12'へと修正している。修正に対するリスケジューリングには短期計画に対しては短期計画ロジック、中長期計画に対しては中長期計画ロジックが適用される。修正されたTask\_1\_2は、T12'が前回計画の開始時刻として設定される。

計画立案者が計画修正した直後は、Task\_1\_2の開始時刻T12'が後作業であるTask\_1\_3の開始時刻T13より未来方向にあり（後になっており）、作業の前後関係に矛盾が生じていた。しかし、リスケジューリング後はその矛盾が解消されていることが分かる。

## 3. 物流管理システム

日程計画システムで作成した計画を現場に指示するため、またリスケジューリング時に必要な最新の進捗情報を収集するため、加工設備の傍らに約190台のPC端末を設置した。また、計画と同期した搬送の実現に必要な部材の位置管理を行うためにRFIDを導入した。図4に物流管理システムの構成を示す。

### 3.1 実績収集機能

どの作業が完了しているか、また数日かかる長い作業の場合はどこまで進捗していつごろ終わりそうな状態であるかといった進捗情報は、高精度な日程計画を立案するためには重要である。そこで、部材の上部に置いたRFID付き作業指示カードをPC端末で読み込むと



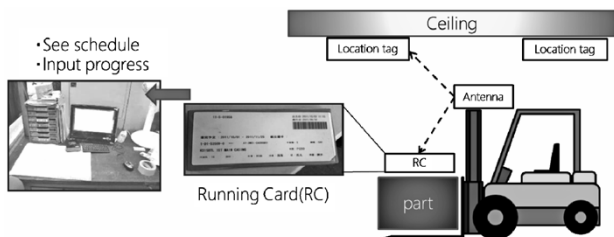


図4 物流管理システム  
Fig. 4 Logistics management system

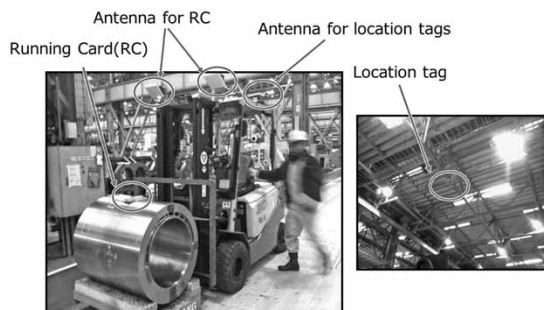


図5 物流管理システムの位置管理機能  
Fig. 5 Location management functions in logistics management system

もに、進捗情報を入力して管理できる実績収集機能を開発した。

### 3.2 位置管理機能

上述の作業指示カード、および天井や柱などに設置した約300個の長距離検知型RFIDタグをフォークリフトに設置したアンテナによって検出し、何をどこへ搬送したかを検知する機能を開発した。さらに、加工完了した部材を次工程に搬送する要求を作業員からフォークリフト端末に無線配信する機能を開発した。これら二つの機能により、日程計画だけでは困難な加工と工場内の物流の同期化を可能にした。図5に位置管理の運用状態を示す。

## 4. 運用状況

開発した日程計画・物流管理システムは加工工場において2012年2月より運用を開始した。6箇月先までの5万作業のスケジュール作成に要する時間は、上位の生産管理システムからのオーダーデータや実績データの取得を含めて約20分である。スケジュールを作成するスケジュールリングサーバの仕様を表2に示す。

表2 スケジュールリングサーバの仕様  
Table 2 Specification of scheduling server

OS	Windows Server 2008
CPU	Intel Xeon 2.30 GHz
MEMORY	12 GB

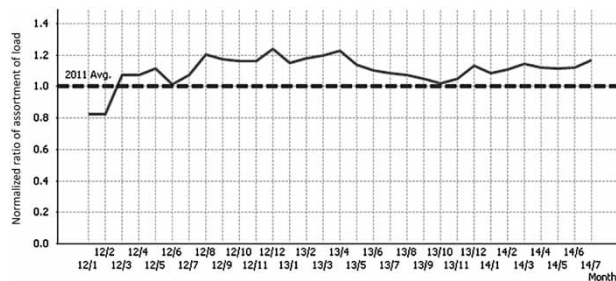


図6 正規化した荷揃率  
Fig. 6 Normalized ratio of assortment of load

運用開始以降の荷揃率の推移を2011年の平均荷揃率で正規化して図6に示した。本システム導入後では荷揃率の向上が確認できた。

むすび= 機械装置用加工部品の加工工場において、加工の納期達成に必要な外注化判断を支援する中長期計画と、作業指示に利用する短期計画を作成する日程計画システムを構築した。本システムには、外注化判断のために納期を制約として必要に応じて設備能力の制約を緩和する中長期計画ロジック、および中長期計画とシームレスにつながる短期計画を作成する短期計画ロジックを新たに開発し、導入した。さらに、RFIDを活用することによって、計画作成のために必要な進捗情報などを収集する物流管理システムを開発した。

本システムの直接の効果は運用後の荷揃率の向上により確認できている。今後は、外注化検討業務のさらなる効率化のために、外注化した場合の荷揃率向上の寄与度が高い作業の抽出方法が技術課題である。

### 参考文献

- 1) 冬木正彦ほか. 日本経営工学会誌. 1995, Vol.46, No.2, p.144-151.
- 2) 荒川雅裕. 日本経営工学会誌. 2001, Vol.51, No.6, p.603-612.
- 3) 荒川雅裕. システム制御情報学会論文誌. 2003, Vol.16, No.9, p.451-460.
- 4) 奥田光伸. 日本機械学会論文集. 2013, Vol.79, No.807, p.423-433.
- 5) J. C. Chen et al. Internal Journal of Electronic Business Management. 2011, Vol.9, No.1, p.46-57.
- 6) Jens Kuhpfahl. Job Shop Scheduling with Consideration of Due Dates. Springer Gabler, 2015, Vol.1, p.173.