

製造 KPI の評価に基づく作業時間に変動がある場合の標準時間の設定

Standard Time Setting under Operation Time Fluctuations Based on Manufacturing KPIs Performance Evaluation

多品種少量生産を行う製造業では、納期遵守率などの KPI 向上に寄与する生産スケジューリングを実現し、競争優位を確立することが求められている。スケジュールは各工程の作業時間が変動せず一意に定まるものと仮定して立案される。しかし実際には製造現場の状況により作業遅延や前倒しによるばらつきが生じるため、計画どおりに進捗せず納期遅れなどにつながる場合がある。作業時間の変動に対して頑健な標準時間マスタの設定が KPI の向上に資する生産スケジューリングの課題となっている。本論文では、作業時間の変動で当初スケジュールとの差異が生じた場合に、現場で調整される作業の開始時間や終了時間をシミュレートするモデルを構築し、シミュレーション結果を用いて相反関係にある複数の KPI を満足させる標準時間の設定値を求める技術を考案した。サンプルデータによる数値実験から、提案手法で求めた標準時間の設定値で立案するスケジュールは、従来の生産工学の手法で求めた設定値で立案したものよりも、総合的な KPI パフォーマンスを向上させることを確認した。

宗形 聡	Munakata Satoshi
黄 双全	Huang Shuangquan
浦邊 信太郎	Urabe Shintaro
伊藤 俊明	Ito Toshiaki

1. はじめに

顧客から様々な製品のオーダーを受注する多品種少量生産の製造業は、受注したオーダーの数量や納期に基づき、各設備でどのロットのどの作業をいつ実施するかを生産スケジューリングで決定している。その際、工場の生産計画担当者は、設備や品目、工程など工場内の固有のパラメータを生産スケジューラのマスタデータとして登録する。各工程で品目を 1 つ製造するために必要な作業時間もマスタデータであり、標準時間（以下、ST と記述）と呼ばれる。ST には製造現場の実態に即して決められた代表値が設定される。生産スケジューラは登録されたマスタデータをもとに、オーダーに紐づく一連の作業に対して、各設備で実行可能な作業量の範囲や作業順序などの制約条件を考慮しつつ、スケジュールを立案する。この意味で、生産スケジューリングは各設備で実施される作業を時間軸に沿ってシミュレートしたものと考えられる。

近年、製造業はグローバルな競争の中で勝ち残っていくことが求められている。そのため、多品種少量生産の

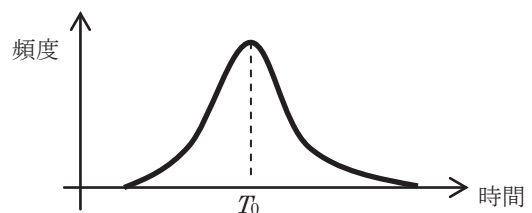


図 1 ある工程 X の作業時間のばらつき

工場では、競争力の源泉となる納期遵守率や設備稼働率など製造に関連する主要な KPI^{1,2)}（以下、製造 KPI と記述）を満足させる生産スケジューリングが求められている。生産スケジューリングでは、作業時間が変動せず一意に定まる条件の下で各作業の開始時間と終了時間を決めている。しかし、実際には作業員の技能や努力、部材の品質、設備の不具合、現場環境などその時々状況に応じて遅延や前倒しによる作業時間のばらつきが生じる。

例えば、ST が T_0 に設定された工程 X の作業時間に図 1 のようなばらつきが見られる場合、かなり高い確率で実

際の作業時間は T_0 を上回るか下回ることになる。したがって、現状のマスタ設定に基づき立案されたスケジュールには、工程Xの遅れが後工程に波及することによる納期遅延や、前倒しによる設備の遊休時間が生じるリスクが内在し、目標とする製造KPIパフォーマンスを得られない可能性がある。このように工程の作業時間にばらつきがある場合でも、目標とする製造KPIの達成につながるロバストなスケジュールを立案可能な、STの設定値の決定が課題となっている。

従来の生産工学では、直接観測法やPTS法のように、実測や過去の経験に基づき算出した作業時間をレイティングし、それをSTに設定する方法が提案されている^{3,4)}。上記の手法は、図1の T_0 のように実態を代表する値をSTに設定するものであり、製造KPIのパフォーマンス向上には必ずしもつながらない。また、スケジューリング理論では、各ジョブの処理時間が確率的に変動する場合にメイクスパンや納期遅延の期待値を最小化する問題の解法についても考案されている^{5,6)}。しかし、指数分布など限られた確率分布が対象で、かつ小規模の問題以外は最適解が容易に求まらないなど実用には依然として高いハードルが存在する。

本論文では、実務で広く利用されるディスパッチング規則を用いて、各工程の作業に遅延や前倒しが生じて当初スケジュールから乖離した場合の各作業の完了見通しをシミュレートするモデルを構築し、シミュレーションに基づき互いに相反関係にある複数の製造KPIを満足させるSTの設定値を求める技術を提案する。

2. シミュレーションモデルと製造 KPI 評価

本章では、工程の作業時間の変動で実際の進捗と当初スケジュールとの間に差異が生じた場合に、すべての作業を時間軸に沿ってシミュレートするモデルを構築する。モデルではまず、設定されたSTに基づき当初スケジュールを立案し、次に工程の作業時間がSTから変動した場合の作業のシミュレーションを実行する。

2.1 作業の割付関数

ある数量の製品を製造するために実施しなければならない一連の作業（工程）のことをジョブと呼ぶ。ジョブの集合を J とし、ジョブ $j \in J$ の作業の集合を O_j とする。すべての作業の集合 O は、 $O = \cup_{j \in J} O_j$ と書ける。また、作業をする機械設備や人をリソースと呼ぶ。リソースの集合を R とする。作業 $o \in O$ の開始時刻 s_o と終了時刻 f_o 、および作業するリソース $r_o \in R$ を決定することを、作業をリ

ソースに割付けるといふ。対象となるすべての作業の割付を決定することをスケジューリングと呼ぶ。ジョブをスケジューリングする関数を $A(J)$ とする。すなわち、 $A(J): j \in J \mapsto \{(r_o, s_o, f_o) | o \in O_j\}$,

である。一般に、1つのリソースは同時に1つの作業しかできないという制約がある場合が多い。この制約は、

$$(r_o \neq r_p) \vee (f_o \leq s_p) \vee (f_p \leq s_o) \quad \forall o, p \in O$$

と書ける。また、1つのジョブの作業には、ある作業が完了しないと次の作業が開始できない順序の制約もある場合が多い。 $O_j = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$ に対して添え字の順番で作業する制約は、 $f_{o_h} < s_{o_{h+1}} \quad \forall h < m$ となる。

さらに、特定の作業はあるリソースでしか処理できないという制約も頻繁に見受けられる。作業 o を処理できるリソースの集合を $R_o \subseteq R$ とすると、この制約は $r_o \in R_o$ となる。材料の到着時刻などによって作業を開始できる時間が制約される場合もある。作業 o の最早開始時間を e_o とすると、 $s_o \geq e_o$ となる。 $A(J)$ はすべての $j \in J$ と $o \in O_j$ について、上記の制約を満たす組 $\{(r_o, s_o, f_o)\}$ を決定する。

スケジューリングでは、作業を開始してから終了するまでの時間がリソースに依存する。作業 o をリソース r_o で処理する場合の作業時間を x_{or} とすると、 $f_o = s_o + x_{or}$ となる。作業時間 x_{or} は作業員の習熟度やその他環境要因などによって変動する。すべての作業時間の組をベクトル \mathbf{x} で表すと、スケジューリングは作業時間ベクトルの関数 $A(J|\mathbf{x})$ と見なすことができる。

2.2 当初スケジュールの作成

リソースごとに設定された各工程のSTのベクトルを \mathbf{x}_m とする。このとき、前節で述べた制約条件を満たすように生成されたスケジューリング $A(J|\mathbf{x}_m)$ を当初スケジュールとする。

$A(J|\mathbf{x}_m)$ の出力である組 $\{(r_o, s_o, f_o) | o \in O_j\}$ は、各リソースで処理待ちをしているジョブに対し、納期優先などのディスパッチング規則にしたがい前方向(フォワード)または後方向(バックワード)に作業を割付けていくことで、求めることができる。

2.3 作業時間変動時のシミュレーション

当初スケジュール $A(J|\mathbf{x}_m)$ に対して、作業時間ベクトル \mathbf{x} が確率分布 $P(\mathbf{x})$ にしたがってSTから変動した場合の各作業のシミュレーションを実行する。STから変動した作業時間ベクトルを \mathbf{x}_v とするとき、シミュレーションは当初スケジュールと変動した作業時間の両方に依存する割付 $A(J|\mathbf{x}_v, \{r_o, s_o, f_o\})$ としてモデル化できる。

シミュレーション $A(J|\mathbf{x}_v, \{r_o, s_o, f_o\})$ には、作業遅延や

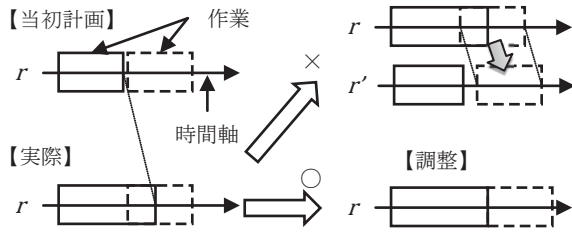


図 2 リソース変更制約

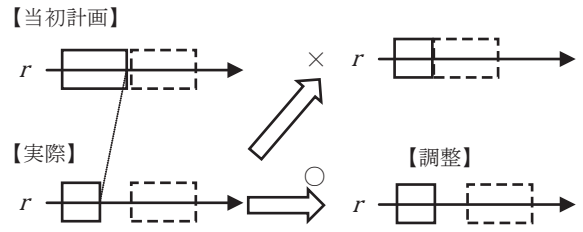


図 4 開始時間変更制約

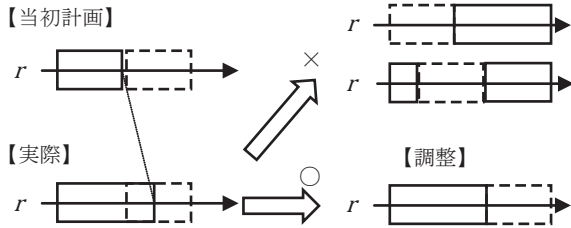


図 3 処理順序変更制約

前倒しが生じた際に製造現場で実施されるスケジュール調整を可能な限り反映できるように、以下に示す3つの制約を新たに付加する。

A) リソース変更制約

先行作業の完了が遅延した場合に、後続作業を別リソースで処理するような調整は当該リソースの稼働状況も考慮しなければならず負荷が高い。そのため現場では、当初スケジュールで割付けたリソースで後続作業を処理するように調整することが多い(図2)。本制約はこのような調整をシミュレーションに反映するためのものであり、以下のように表現される。

当初スケジュール $A(J|\mathbf{x}_m) = \{(r_o, s_o, f_o) | o \in O\}$ に対して、変動した作業時間 \mathbf{x}_v で実行したシミュレーション $A(J|\mathbf{x}_v, \{r_o, s_o, f_o\}) = \{(\hat{r}_o, \hat{s}_o, \hat{f}_o) | o \in O\}$ は $\hat{r}_o = r_o$ を満たす。

B) 処理順序変更制約

先行作業の遅延が明らかになった場合でも、現場では後続する別のジョブの作業を先行させたり、割り込ませたりして先に処理するケースは少ない(図3)。本制約はこのような調整をシミュレーションに反映させるものであり、以下のように表現される。

当初スケジュール $A(J|\mathbf{x}_m) = \{(r_o, s_o, f_o) | o \in O\}$ で $r_{o_i} = r_{o_j}$ を満たす2つの作業 o_i と o_j に対して $f_{o_i} \leq s_{o_j}$ ならば、変動した作業時間 \mathbf{x}_v で実行したシミュレーション $A(J|\mathbf{x}_v, \{r_o, s_o, f_o\}) = \{(\hat{r}_o, \hat{s}_o, \hat{f}_o) | o \in O\}$ の同じ2つの作業 o_i と o_j もまた $\hat{f}_{o_i} \leq \hat{s}_{o_j}$ を満たす。

表 1 製造 KPI の評価値の相反関係

	$h_1(\mathbf{x}_m)$	$h_2(\mathbf{x}_m)$
ST の設定値が増加	減少	増加
ST の設定値が減少	増加	減少

C) 開始時間変更制約

先行作業が前倒しで完了しても、その後のスケジュールへの影響を考慮して現場では後続作業の着手を早めず、当初の製造指図にしたがって進める場合が多い(図4)。本制約はこのような調整をシミュレーションに反映させるものであり、以下のように表現される。

当初スケジュール $A(J|\mathbf{x}_m) = \{(r_o, s_o, f_o) | o \in O\}$ でリソース r 上に連続して割付けられた2つの作業 o_i と o_j に対して、変動した作業時間 \mathbf{x}_v で実行したシミュレーション $A(J|\mathbf{x}_v, \{r_o, s_o, f_o\}) = \{(r_o, \hat{s}_o, \hat{f}_o) | o \in O\}$ で同一の作業 o_i が $\hat{f}_{o_i} < f_{o_i}$ となった場合でも、作業 o_j は $\hat{s}_{o_j} = s_{o_j}$ を満たす。

2.4 製造KPIの評価

作業時間の確率分布 $P(\mathbf{x})$ にしたがうサンプル \mathbf{x}_v を多数生成してシミュレーション $A(J|\mathbf{x}_v, \{r_o, s_o, f_o\})$ を実行し、作業時間が様々に変動した場合に期待される製造KPIのパフォーマンスを評価する。シミュレーション結果は当初スケジュールに依存し、かつ当初スケジュールはSTの設定値に依存する。そのため、シミュレーション結果に依存する製造KPIもまたSTの設定値 \mathbf{x}_m の関数 $h(\mathbf{x}_m)$ である。本論文では、下記に示す2つの製造KPIを評価する。

KPI1. オーダ要求納期対応率 $h_1(\mathbf{x}_m)$

オーダ要求納期対応率 $h_1(\mathbf{x}_m)$ は、当初スケジュール $A(J|\mathbf{x}_m)$ を立案した時点でオーダの要求納期までに作業を完了できるジョブ j の割合を表す。すなわち計画対象のジョブの数を n とするとき、

$$h_1(\mathbf{x}_m) = (1/n) * \left(\sum_{j=1}^n \delta(d_j - F_j(\mathbf{x}_m)) \right)$$

として求める。ここで、 d_j はジョブ j の最遅作業完了時間(納期)である。 $F_j(\mathbf{x}_m)$ はシミュレーションで割付けられたジョブ j の一連の作業 O_j から、当該ジョブの作業完了時

表 2 部品構成表 (数字は員数)

	部品 α	部品 β	部品 γ
製品 A	2	2	1
製品 B	1	3	2

表 3 オーダ情報

	期間	受注 オーダ	期間 製造量	納期 設定
製品 A	9/1~30	5	65	任意
製品 B	9/1~30	5	80	週末

間を求める関数である。また、 $\delta(z)$ は $z \geq 0$ のとき $\delta(z) = 1$ 、 $z < 0$ のとき $\delta(z) = 0$ となる関数である。

KPI2. スケジュール遵守率 $h_2(\mathbf{x}_m)$

スケジュール遵守率は、変動した作業時間 \mathbf{x}_v で実行したシミュレーション $A(J|\mathbf{x}_v, \{r_o, s_o, f_o\})$ の結果、全ジョブの中で当初スケジュールを遵守できたジョブ j の割合を表す。すなわち計画対象のジョブ数を n とすると、

$$h_2(\mathbf{x}_m) = (1/n) * \int P(\mathbf{x}_v) \left(\sum_{j=1}^n \delta(F_j(\mathbf{x}_m) - F_j(\mathbf{x}_v)) \right) d\mathbf{x}_v$$
 として求める。右辺の積分は \mathbf{x}_v のサンプリングをもとに近似計算する。

オーダ要求納期対応率とスケジュール遵守率の間には、STの設定値 \mathbf{x}_m の増減に応じてトレードオフの関係にある。2つの製造KPIの相反関係を表1に整理する。製造KPIの相反関係は、作業時間のばらつきを前提にした上でSTに設定する適切な代表値を決めるために利用する。

3. 製造 KPI を満足させる最適な ST の決定

ST の設定に応じて評価値がトレードオフする l 個の製造 KPI があるとき、実際の作業時間が ST から変動することを考慮して、各製造 KPI の評価値をできる限り良くするような ST の設定値を求める問題は、多目的最適化問題として定式化できる。多目的 GA などの解法を用いれば、目的変数間のトレードオフを踏まえてパレート最適解の集合を得ることが可能である。

しかし本論文では、問題の複雑度や解探索の計算効率などを考慮し、スカラー化した単一目的の最適化問題として定式化した。

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } H(\mathbf{x}_m) = \sum_l w_l h_l(\mathbf{x}_m) & (1) \\ & \text{subject to } \mathbf{x}_m \leq \mathbf{x}_{UB}, \\ & \mathbf{x}_m \geq \mathbf{x}_{LB}. \end{aligned}$$

ここで、 w_l は製造 KPI の評価値 $h_l(\mathbf{x}_m)$ の重みで、 $\sum_l w_l = 1$ を満たす。また、 \mathbf{x}_{UB} は \mathbf{x}_m の上限値ベクトル、 \mathbf{x}_{LB}

表 4 部品 β ボール盤工程の実作業時間分布

(分)	30	31	32	33	34	35	36
割合	0.10	0.40	0.25	0.12	0.08	0.04	0.01

表 5 作業割付の前提条件

項目	設定値
ディスパッチング規則	最早要求納期優先
作業割付方向	フォワード (前方向)

は \mathbf{x}_m の下限値ベクトルである。最適化問題 (1) の解 \mathbf{x}_m^* は、作業遅延や前倒しにより当初スケジュールから乖離が生じて、製造 KPI を総合的に最大化する ST の設定値である。

4. 数値実験

最適化問題 (1) の解として求まる、作業時間の変動を考慮した ST の設定値を評価する数値実験を行った。実験には金属加工ラインの評価用データを用いた。データは 9 設備、5 品目から構成される。5 品目のうち 2 つは製品、残りの 3 つは部品となっている。部品構成表を表 2 に示す。工程種別は、部品については切削、ボール盤、NC 旋盤、バリ取り、溶接、内面研磨、洗浄の 7 種類ある。ただし、加工に必要な工程数と工程順序は部品によって異なる。また、製品については組立と検査の 2 種類の工程がある。このラインでは 1 つの設備で 1 つの工程が処理される。

実験に用いた製品のオーダの情報を表 3 に示す。製品 A・B ともに 9 月に受注したオーダで、その数は 5 である。オーダの納期は概ね各週に分けて設定されており、製品 A の納期は各週の任意の曜日、製品 B の納期は毎週末となっている。また、オーダごとに製品の製造量は異なるが、9 月については製品 B の方が製造量は多い。生産計画担当者は、期日までにオーダを納品できるように生産スケジュールを用いて 9 月度スケジュールを立案し、現場はスケジュールに基づいて製造を実行する。

本実験では、作業時間のばらつきを踏まえて ST の設定値を決める工程として、製造量の多い部品 β のボール盤を選択した。提案したシミュレーションによる手法と、従来の生産工学による手法でそれぞれ ST の設定値を求め、各設定値の下で期待される製造 KPI のパフォーマンスから両手法を評価する。製造 KPI はオーダ要求納期対応率とスケジュール遵守率の 2 つである。なお、9 月度計画時点での当該工程の ST は 32 分である。9 月の製造

の結果、部品 B の 1 個当たりのボール盤処理に要した実作業時間分布を表 4 に示す。表 4 によれば、実際の作業時間は ST よりも短い傾向にあることが分かる。

シミュレーションの実行に際し、当初スケジュール $A(J|\mathbf{x}_m)$ で用いた作業割付の前提条件を表 5 に示す。提案手法ではシミュレーションにより目的関数 $H(\mathbf{x}_m)$ の値を求める。実験では $\mathbf{x}_{LB} = 30$, $\mathbf{x}_{UB} = 36$ として $H(\mathbf{x}_m)$ を最大にする \mathbf{x}_m^* を求め、最適解 \mathbf{x}_m^* を今後のスケジューリングに適用するボール盤工程の ST 設定値とする。2 つの製造 KPI の重み $w_l (l = 1, 2)$ はそれぞれ $1/2$ としている。また、シミュレーションで用いる工程の実作業時間の分布 $P(\mathbf{x})$ には表 4 の出現割合を用いている。シミュレーション回数は 100 とした。

ボール盤工程の ST の設定値 \mathbf{x}_m に応じた製造 KPI の評価値の変化を図 5 に示す。図 5 によると、ボール盤工程の標準時間 32 分で立案した当初スケジュールは、計画はオーダの要求納期に 100% 対応可能であるが、作業時間の変動を踏まえると実際には約 80% のオーダしかスケジュールを遵守できないことが分かる。受注を獲得するためにスケジュールを基に要求納期よりも以前の納品を約束したり、スケジュールと要求納期の間にバッファがなかったりすると、残りの 20% のオーダは納期遅れとなるリスクが高い。

一方、目的関数を最大化する作業時間 34 分でスケジュールを立案すると、計画は 90% のオーダ納期対応率となる。残り 10% のオーダについてはこのままでは納期を満たせないため、残業による工数確保や分割納入などの交渉が別途必要になるが、製造時に実際に作業時間が変動してもほぼすべてのオーダのスケジュールを遵守することができる。このように、ST からの作業時間のばらつきを踏まえたシミュレーションを通して製造 KPI を評価することにより、相反する製造 KPI を可能な限り満足させる ST の設定値を見つけることができる。

同じ作業実績が得られた場合、従来の生産工学の手法では、作業時間のばらつきが作業員の熟練度や現場環境などにより生じているものとして、レイティングした値を新たな ST の設定値とする。例えば、表 4 の作業時間の出現割合が熟練度や環境の違いを反映したものを見なし、割合を重みとして期待値でレイティングすると、新たな ST は 31.84 分となり、設定値としては当初 ST の 32 分を変える必要はないという結論になる。したがって従来手法は、2 つの製造 KPI の総合的なパフォーマンスとしては、最大化されない ST 設定値となる。

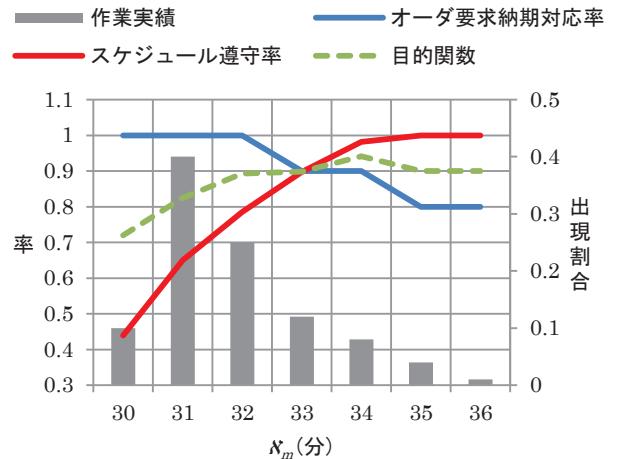


図5 ST設定値による製造KPI評価値の変化 (作業実績は右軸，製造KPIは左軸)

5. おわりに

本論文では、工程の作業時間が ST から変動することによって当初スケジュールと実際の作業進捗との間に生じる乖離をシミュレーションし、シミュレーション結果から互いに相反する製造 KPI を総合的に最大化する ST の設定値を求める技術を提案した。シミュレーションは、当初スケジュールに対して作業の遅延や前倒しが発生した際に、製造現場で行われる作業調整を近似するための新たな制約を付加したスケジューリング関数として実現した。また、シミュレーション結果に依存する製造 KPI としてオーダ要求納期対応率とスケジュール遵守率の 2 つの定義し、2 つの製造 KPI の加重和を最大化する最適化問題を解くことによって、作業時間にばらつきがある場合の ST として最適な代表値を求める手法を構築した。

金属加工ラインのサンプルデータを用いた数値実験から、提案手法で求めた ST の設定値は、従来の生産工学の手法で求めた設定値よりも、トレードオフの関係にある 2 つの製造 KPI を総合的に最大化することを確認した。

近年では、IoT (Internet of Things) の普及で製造現場にも各種センサーが設置されるようになり、各工程の作業実績や設備の稼働実績がデータベースに蓄積されつつある。今後は、こうしたデータベースと提案手法を実装したシステム、そして生産スケジューラが互いに連携したソリューションの確立を目標としていく。ソリューションの確立により、データベースから定期的に作業実績を収集して作業時間の分布を生成し、提案システムで今後のスケジューリングに最適な ST の設定値を求め、更新後の ST に基づき生産スケジューラで日程計画を立てる一連のサイクルを回すことが可能になる。

参考文献

- 1) David Parmenter: Key Performance Indicators: Developing, Implementing, and Using Winning KPIs, John Wiley & Son, (2006)
- 2) ISO 22400-2: 2014: Automation systems and integration - Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management – Part 2: Definitions and descriptions, International Organization for Standardization, (2014)
- 3) 橋本, 他: 生産管理システム, 共立出版株式会社, (1993)
- 4) 菅間: 図解入門ビジネス生産現場の管理手法がよくわかる本, 株式会社秀和システム, (2013)
- 5) Michael L. Pinedo: Scheduling Theory, Algorithms, and Systems, Springer, (2012)
- 6) 山下: 生産システムの確率モデルと最適化, オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, vol.59, No.4, pp.205-211 (2014)
- 7) 中山: あれもこれもよくしたい多目的計画法, オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, vol.41, No.6, pp.343-348 (1996)



宗形 聡 2003 年入社
研究開発部
数理モデルや機械学習を用いた意思決定支援技術, データ分析技術の研究開発
satoshi.munakata.tu@hitachi-solutions.com



黄 双全 2010 年入社
研究開発部
生産計画・生産スケジューリング, SCM シミュレーション技術および最適化技術の研究開発
shuangquan.huang.dc@hitachi-solutions.com



浦邊 信太郎 2007 年入社
研究開発部
製造業での需給調整業務に関する業務分析, BI ツールの研究開発
shintaro.urabe.dc@hitachi-solutions.com



伊藤 俊明 1993 年入社
研究開発部
製造業での生産計画, 生産管理, IoT 活用に関する研究開発
toshiaki.ito.tu@hitachi-solutions.com