数理計画モデルによる熟練者エージェントへの接近 — 一段取り時間に不確実性を有する スケジューリング問題を対象として —

玉置 久*・杉川 智*²

An Approach for Designing Expert Agent Based on Mathematical Programming Model
— A Case of Scheduling Problems with Uncertainty in Set-up Operations —

Hisashi TAMAKI and Satoshi SUGIKAWA

Synopsis : Due to a large amount of the retirement of experienced personnel, it is one of the most serious issues how the technical predominance of manufacturing industries, such as iron and steel industries in Japan, can be maintained. Here, from the viewpoint of problem-solving by experienced personnel, the acquisition and the utilization of some additional and essential information might be crucial. According to this observation, in the paper, a kind of scheduling problems, *i.e.*, a scheduling problem of the flexible flow shop type with uncertainty in set-up operations, is taken as an example of the problem-solving in manufacturing industries. Then, a mathematical programming-based approach is investigated, where two kinds of optimization models are formulated: One is the model of the solution by unskillful personnel in which only the normal (or common) data is used, whereas the other is the solution model by experienced personnel in which some additional information is available. Furthermore, through some computational examples for the simplified scheduling problem of the flexible flow shop type, the potential of the experienced personnel model, *i.e.*, the robustness of the obtained schedule for uncertain situations, has been confirmed.

Key words: flexible shop scheduling; mathematical programming; uncertainty; agent; simulation.

1. 緒言

鉄鋼生産は複数工程を有する多段階プロセスであり、近年、生産管理などを含めた鉄鋼生産システムの大規模化のみならず、その複雑化も顕著である。これに伴い、計画立案過程における問題解決（意思決定）がますます難しくなっている。特に、生産計画や生産スケジューリングに際しては、最適解を得ることが困難（現実的に不可能）となるばかりか、事前に問題そのものを正確に把握することすら極めて難しいというのが現状である。

そこで、経験などにもとづいて何らかのルール（問題解決手順）を形成しておき、このルールによって許容し得る解を導くのが一般的となっている。しかしながら、計画やスケジューリングに用いるルールの作成・運用は熟練者の経験によるところが大きく、また完全に形式化できるものではない。すなわち、計画立案過程における熟練者の役割を無視することはできない。このような状況に、昨今の熟練者の高齢化・定年退職の問題が相まって、これまで熟練者が果たしてきた機能を代替・補完する方策が肝要となっている。その一つとして、エージェント技術による支援シ

ステムの構築が期待されているところである^{1,2)}。

ここで、計画立案過程における熟練者の問題解決についてみると、設備の脱調、特急オーダーの発生、あるいは製品の不具合などの不確実な事象を予想しつつ、一見すると非効率な計画を立てながらも、結果的に良好な運用を実現している場合が少なくない。そこで、本研究では、不確実性などの状況認識に関わる情報の獲得とその有効な利用が熟練者の本質であると考え、このような情報の多少が計画の良さを決定付けるものであるとする。

すなわち、認識（情報の獲得）と決定（情報の利用）に注目した意思決定過程のエージェント・モデルをFig. 1のようにとらえ、計画対象工程の状況を認識し、この認識結果にもとづいて何らかの判断・決定を行った結果を工程に反映させることによって意思決定が行われているといった枠組みを考える。このとき、熟練者は認識と判断のための経験にもとづくノウハウを有しており、このノウハウを利用することで、より適切な認識と判断・決定が可能であると考えられる。Fig. 1でみると、図中[#]で示す部分の情報の質・量の多少が意思決定に際して重要な役割を担うことになる。このような観点から、著者らは特に有効な情報の

平成22年10月20日受付 平成23年1月12日受理 (Received on Oct. 20, 2010; Accepted on Jan. 12, 2011)

* 神戸大学大学院システム情報学研究科 (Graduate School of System Informatics, Kobe University, Rokko-dai Nada-ku Kobe 657-8501)

*2 神戸大学大学院自然科学研究科 (Graduate School of Science and Technology, Kobe University)

Fig. 1. Framework of decision-making process.

Fig. 2. Outline of optimization models. (a) Unskillful personnel case (b) Experienced personnel case.

利用といった側面に焦点を当て、熟練者および非熟練者による問題解決のモデルを試案しつつある^{3,4)}。

以下、本論文では、鉄鋼生産プロセスにおける計画立案問題の一例として、段取り時間に不確実性を有するスケジューリング問題を取り上げ、まず問題を形式的に記述する。次に、この問題に対して、非熟練者および熟練者がともに獲得し得る情報（標準情報）に加え、熟練者は経験情報（付加情報）を獲得できるという想定のもとで、標準情報と付加情報にもとづく数理計画モデルを提案する（Fig. 2）。さらに、提案モデルによる計算例を示し、計画と実施結果（シミュレーション）の比較を通して、不確実性に対するスケジュールのロバスト性という観点から提案モデルの可能性・有用性を確認する。

2. 段取り時間に不確実性を有するスケジューリング問題

2.1 問題の概要

製鋼工程（転炉-連続铸造）におけるスケジューリング問題を考える。この工程では、キャスト間に段取り時間が存在するため、段取り時間の短縮が生産性向上のために重要である。しかしながら、計画段階でキャスト間の標準段

取り時間があらかじめ与えられるものの、生産実施段階においてキャストの抜けや変更によって標準段取りとは異なる段取りが発生することもあり、段取り時間に不確実性が存在することになる。

そこで、製鋼工程スケジューリング問題をも含む問題のクラス、すなわち段取り時間に不確実性を有するフレキシブルショップ問題を対象とし⁵⁾、1章に記したアプローチによる最適化モデルの構築を図る。この際、熟練者は非熟練者に比べて状況認識が適切であり、不確実な段取り時間に関する情報がリッチであるとする。なお、1章でも触れたように、このような状況認識・予測ができていないものとし、その結果にもとづいて意思決定を行う（スケジュールを作成する）過程に焦点を当てる。

より具体的には、非熟練者が標準情報として段取り時間の標準値（平均値や最頻値など）を有しているのに対して、熟練者は付加情報として起こり得る段取り時間のいくつかの予測値（最大値や最小値など）を有するものとする。このとき、熟練者は段取り時間の見積りを計画対象期間に予想される状況に合わせる（絞り込む）ことによって、よりロバストなスケジュールを生成することが期待される。

ここで、段取り時間の予測値に関連して、その実現値に関する確率分布が正確に与えられる場合には、ロバスト最適化⁶⁾の枠組みを適用することによって、スケジュールの評価（メイクスパンなど）の期待値を最小にするスケジュールを求めるといったアプローチも考えられるが、現時点では、情報獲得面ならびに解法構成面において実用性に乏しいと言わざるを得ない⁷⁾。これに対して、本研究は、アプローチそのものが独自であり、解法側で必要とする情報の質や量を規定することなく、利用可能な情報の有効利用を図るものである。

2.2 問題の定義

本研究で対象とするフレキシブルショップ・スケジューリング問題は、以下のように定義される。いくつかの製品がそれぞれあらかじめ定められた工程での処理を通して生産されるものとする。ここで、各工程での処理単位を仕事と定義し、製品特有の処理工程順序を仕事間の先行後続関係で表すものとする。形式的には、いくつかの仕事 J_j ($j=1, \dots, N^J$) がいくつかの機械 M_i ($i=1, \dots, N^M$) で処理されるものとし、各仕事 J_j に対して、

(a) 処理可能機械群 $\mathcal{M}_j \subseteq \{1, \dots, N^M\}$,

(b) 先行仕事群 $\mathcal{T}_j \subset \{1, \dots, N^J\}$,

(c) 処理時間 p_j ,

(d) 処理開始可能時刻（準備完了時刻） a_j ,

(e) タイプ k_j

が与えられているものとする。ここで、タイプは段取り作業の有無とその時間に関連するものであり、ある機械上でタイプ k の仕事の直後にタイプ k' の仕事処理される場合に、固有の段取り時間 $g_{kk'}$ が必要となるものとする。なお、

次の3.1節で示すように、この $g_{kk'}$ の見積りが完全ではない状況を考える。

ここで、スケジュールの評価基準としてメイクスパン（最大完了時間）を想定すると、問題は、このメイクスパンを最小とするように、各仕事の機械割付け、開始時刻および完了時刻を決定することと定義される。なお、メイクスパンのような正規目的関数を考慮する場合には、各機械上での仕事の順序が与えられると、できるだけ前詰めで処理するという方針の下で開始時刻（最早開始時刻）を定めればいいことがわかっている⁸⁾。そこで、問題の決定変数を、各仕事 J_j の

(1) 機械割付け $x_{ij} \in \{0, 1\}$: J_j が M_i に割り付けられるとき1、そうでないとき0、

(2) 処理順序 $u_{ijj'} \in \{0, 1\}$: M_i 上で J_j の直後に $J_{j'}$ が処理されるとき1、そうでないとき0

とし、

(3) 開始時刻 s_j : 決定変数 x_{ij} および $u_{ijj'}$ のもとでの最早開始時刻、

(4) 完了時刻 c_j : 開始時刻 s_j +処理時間 p_j

は従属的に決まるものであるといった考え方のもとで、数理計画モデルの構築を図る。

3. 熟練者と非熟練者の数理計画モデル

3.1 問題設定

2章で定義されたスケジューリング問題において、段取り時間に不確実性が含まれる場合を想定する。すなわち、あらかじめ与えられる段取り時間 $g_{kk'}$ が十分に信頼できるものではなく、実際に必要な段取り時間はこの値より長くなったり短くなったりする状況を考える。

このような状況において、非熟練者は段取り時間に関する標準的な値 $\bar{g}_{kk'}$ のみを標準情報として保持しているものとする（典型的には、実際に必要な段取り時間の平均値）。一方、熟練者は、標準情報に加えていくつかの予測値 $g_{lkk'}$ ($l=1, \dots, N^L$)を付加情報として獲得しているものとする（例えば、必要な段取り時間の最大値や最小値）。

以下では、記述の便宜上、 $\bar{g}_{kk'}$ を $g_{1kk'}$ として $g_{lkk'}$ に含めるものとし、 $g_{lkk'}$ ($l=1, \dots, N^L$)が標準情報と付加情報を合わせた段取り時間の予測値を表すものとする（非熟練者に対しては $N^L=1$ とする）。さらに、ある段取り時間の予測値 $g_{lkk'}$ にもとづいて定められる仕事 J_j の開始時刻および完了時刻を、それぞれ s_j および c_j と表すものとする。

このとき、仕事の機械割付け $x=\{x_{ij}\}$ および処理順序 $u=\{u_{ijj'}\}$ が与えられれば、そのときのスケジュール（すなわち仕事の機械割付け、開始時刻および完了時刻）が $S(g)(x, u)$ のように生成できることになる。また、このスケジュール S に対して評価値（メイクスパン）が $f(S(g)(x, u))$ のように定量化されることになる。

以下の3.2節および3.3節において、 $S(g_l)(x, u)$ を規定する関係式および $f(S(g_l)(x, u))$ の計算式を、それぞれ制約条件および目的関数とした数理計画モデルの詳細を記す。ここでの基本的考え方は、 N^L 個の段取り時間予測値を用いたスケジュール評価の重み付き和を最小化する形のモデル：

$$\min_{x, u} \sum_l w_l \cdot f(S(g_l)(x, u)) \dots\dots\dots (1)$$

を考えることにある。ここで、 w_l ($l=1, \dots, N^L$)は重み係数であり、この設定にも熟練者の経験が活かされるものである（ただし、この点に関する議論は本論文では対象外とする）。

3.2 定式化—制約条件

3.1節での考え方のもと、まず、スケジュール（すなわち仕事の機械割付け、開始時刻および完了時刻）を規定するための関係式を制約条件として列挙する。まず、2.2節で導入・定義した定数（○印）および変数（●印）を整理しておく。

○ N^M : 機械数。

○ N^J : 仕事数。

○ N^L : 予測値サンプル数。

○ M_j : 仕事 J_j の処理可能機械群。

○ $\mathcal{T}_j$: 仕事 J_j の先行仕事群。

○ p_j : 仕事 J_j の処理時間。

○ a_j : 仕事 J_j の処理開始可能時刻。

○ k_j : 仕事 J_j のタイプ。

○ $g_{lkk'}$: 段取り時間予測値。同一機械でタイプ k の仕事の直後にタイプ k' の仕事が処理される場合に必要な段取り時間($g_{kk'}$)に関する l 番目の予測値サンプル。

● x_{ij} : 機械割付け。仕事 J_j が M_i に割り付けられるとき1。

● $u_{ijj'}$: 処理順序。機械 M_i 上で仕事 J_j の直後に $J_{j'}$ が処理されるとき1。

● s_j : 段取り時間の l 番目の予測値サンプルにもとづいて定まる仕事 J_j の開始時刻。

● c_j : 完了時刻。開始時刻 s_j +処理時間 p_j で与えられる仕事 J_j の完了時刻。

これらの定数および変数を用いて、制約条件（関係式）を以下のように記述する。

$$c_j = s_j + p_j \quad (l=1, \dots, N^L; j=1, \dots, N^J) \dots\dots\dots (2)$$

$$a_j \leq s_j \quad (l=1, \dots, N^L; j=1, \dots, N^J) \dots\dots\dots (3)$$

$$c_j + g_{lkk_j} \leq s_{j'} + B(1 - u_{jj'}) \quad (i=1, \dots, N^M; l=1, \dots, N^L; j, j'=1, \dots, N^J; j \neq j') \dots\dots\dots (4)$$

$$c_j \leq s_{j'} \quad (l=1, \dots, N^L; j=1, \dots, N^J; j' \in \mathcal{T}_j) \dots\dots\dots (5)$$

$$\sum_i x_{ij} = 1 \quad (j=1, \dots, N^J) \dots\dots\dots (6)$$

$$x_{ij} = 0 \quad (i \notin M_j; j = 1, \dots, N^J) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$u_{ijj'} + u_{ij'j} \leq 1 \quad (i = 1, \dots, N^M; j, j' = 1, \dots, N^J; j \neq j') \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\sum_{j'} u_{ijj'} \leq 1 \quad (i = 1, \dots, N^M; j = 1, \dots, N^J) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\sum_j u_{ijj'} \leq 1 \quad (i = 1, \dots, N^M; j = 1, \dots, N^J) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$x_{ij} \geq u_{ijj'} \quad (i = 1, \dots, N^M; j, j' = 1, \dots, N^J; j \neq j') \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\sum_j \sum_{j'} u_{ijj'} \geq \sum_j x_{ij} - 1 \quad (i = 1, \dots, N^M) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$u_{ijj'} \in \{0, 1\} \quad (i = 1, \dots, N^M; j, j' = 1, \dots, N^J; j \neq j') \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (i = 1, \dots, N^M; j = 1, \dots, N^J) \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここで、式(4)中のBは十分に大きな正の定数である。また、関係式(2)~(5)は、段取り時間に関する情報を利用して計算される仕事の開始時刻および完了時刻を定めるものである。すなわち、完了時刻が(開始時刻+処理時間)で与えられること(式(2))、開始時刻が処理開始可能時刻以降となること(式(3))、同一機械で連続して処理される仕事間に段取り時間が必要であること(式(4))、先行関係が課せられている場合には後続仕事の開始時刻が先行仕事の完了時刻以降となること(式(5))、が定められている。

さらに、関係式(6)~(12)は、仕事の機械割付けおよび順序付けに関する制約を表すものである。すなわち、各仕事が処理可能機械群のいずれか一つの機械に割り付けられること(式(6),(7))、仕事間の順序関係に矛盾(循環)が生じないこと(式(8))、各仕事の直前および直後の仕事はそれぞれ一つであること(式(9),(10))、同一機械に割り付けられた仕事間にのみ順序関係が定められること(式(11))、同一機械に割り付けられた仕事群に対して全順序が与えられること(式(12))、が課せられている。

3.3 定式化—目的関数

3.2節で定式化された制約条件のもとで、熟練者および非熟練者に対応する目的関数をそれぞれ以下のように定めることにより、2種類の最適化モデルが設定される。なお、3.1節でも記したように、熟練者モデルにおける $w_l(l=1, \dots, N^L)$ は付加情報(いくつかの段取り時間予測値) g_l に対する重み係数である。

(1) 熟練者モデル:

$$\text{minimize} \quad \sum_l w_l \cdot \max_j \{c_{lj}\} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\text{subject to} \quad \text{Eqs. (2) through (14)} \quad \dots\dots\dots (16)$$

(2) 非熟練者モデル:

$$\text{minimize} \quad \max_j \{c_{1j}\} \quad \dots\dots\dots (17)$$

Fig. 3. Positioning of our mathematical programming model within the decision-making framework (Fig. 1).

$$\text{subject to} \quad \text{Eqs. (2) through (14)} \quad \dots\dots\dots (18)$$

Fig. 3に、エージェントの意思決定モデル(Fig. 1)における数理計画モデルの位置付けを明確にしておく。図中、 g_l および w_l はそれぞれ段取り時間予測値および重み係数を表すものであり、ここでの数理計画モデルが、有効な情報(g_l)の利用による判断・決定プロセス(w_l にもとづく最適化)を担う形になっていることが示されている。

4. 計算例

例題として、Table 1に示す10仕事、2工程、4機械の単純化された問題例で、工程2において異なる種類(タイプ)の仕事の同一機械上で連続して処理する際に段取り時間が必要となるものを考える。段取り時間については、最小値 $g_{\min}$ 、最大値 $g_{\max}$ および最頻値 g_{mode} をパラメータとする三角分布に従うことがわかっているものとする。ここで、 $g_{\min}$ および $g_{\max}$ については、Table 2で与えられる最頻値 g_{mode} および分散指標 Δg を用いて、

$$g_{\min} = g_{\text{mode}} - \lambda_1 \Delta g \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$g_{\max} = g_{\text{mode}} + \lambda_2 \Delta g \quad \dots\dots\dots (20)$$

と定められるものとし、この λ_1, λ_2 をTable 3のように設定した3種類の例題I, II, IIIを考える。

簡単のため、標準情報として g_{mode} 、付加情報として $g_{\max}$ および $g_{\min}$ が認識されているものとする(すなわち、 $g_1 = g_{\text{mode}}, g_2 = g_{\max}, g_3 = g_{\min}$)。このとき、数理計画モデルにおける目的関数(15)は、

$$\min_x \{w_1 f_{g_{\text{mode}}}(x) + w_2 f_{g_{\max}}(x) + w_3 f_{g_{\min}}(x)\} \quad \dots\dots\dots (21)$$

の形式となる。ただし、 $f_g(x)$ は、段取り時間が g であるとしてスケジュール x を評価した場合のメイクスパンの値で、重みパラメータ w_1, w_2, w_3 については、Table 4のような設定を適用するものとする。このとき、ケースAは分布の最頻値のみがあらかじめわかっている(利用できる)場合であり、非熟練者に相当する設定である。また、ケースB, C, ..., Eは熟練者相当で、平均値以外のばらつきに關

Table 1. Problem instance.

Job J_j	Release time a_j	Type k_j	Proc. Time p_j	Successor J_j	Available machine M_j
1	0	1	9	{2}	{1, 2}
2	0	1	6	-	{3, 4}
3	0	2	7	{4}	{1, 2}
4	0	2	7	-	{3, 4}
5	0	3	9	{6}	{1, 2}
6	0	3	5	-	{3, 4}
7	0	4	6	{8}	{1, 2}
8	0	4	8	-	{3, 4}
9	0	5	6	{10}	{1, 2}
10	0	5	7	-	{3, 4}

Table 2. Basic parameters of set-up time.

k	$k'=1$	2	3	4	5
1	0 (0)	20 (15)	25 (2)	30 (5)	40 (7)
2	40 (7)	0 (0)	20 (15)	25 (2)	30 (5)
3	30 (5)	40 (7)	0 (0)	20 (15)	25 (2)
4	25 (2)	30 (5)	40 (7)	0 (0)	20 (15)
5	20 (15)	25 (2)	30 (5)	40 (7)	0 (0)

Mode value of set-up time g_{mode} (and its distribution index Δg in parentheses), when a job of the type k' are processed just after a job of the type k , are shown.

Table 3. Characteristic parameters.

Problem	λ_1	λ_2
I	0.1	2
II	0.1	5
III	0.5	2

Table 4. Weight parameters.

Case	w_1	w_2	w_3
A	1.0	0.0	0.0
B	0.8	0.1	0.1
C	0.1	0.8	0.1
D	0.1	0.1	0.8
E	0.33	0.33	0.33

る情報をも利用できる場合であるが、その利用の仕方が異なるものである。

例題 I, II および III に対して、まず、ケース A, B, ..., E の設定による数理計画モデルを用いて最適スケジュール、より正確には (x, u) の最適値 (x^*, u^*) :

$$(x^*, u^*) = \arg \min_{x, u} \sum_l w_l \cdot f(S(g_l)(x, u)) \quad \dots\dots\dots (22)$$

を求め、このもとで、標準情報（段取り時間の最頻値）を用いてスケジュール $S(g_{\text{mode}})(x^*, u^*)$ を生成した（以下、このスケジュールを“計画スケジュール”と呼ぶ）。次に、それぞれのケースについて、段取り時間をランダムに発生させることにより生産実施のシミュレーションを 100 回行った。すなわち、段取り時間のランダム・サンプルを $\hat{g}_n$ ($n=1, \dots, 100$) とし、 $S(\hat{g}_n)(x^*, u^*)$ を $n=1, \dots, 100$ について求

Fig. 4. Computational results. The makespan of the planned schedule and that of the simulation results are indicated by circle and ladder, respectively.

めた（以下“実施スケジュール”と呼ぶ）。

Fig. 4 に、結果として得られた計画スケジュールおよび実施スケジュールの評価値を示す。図中、計画スケジュールの評価値 $f(S(g_{\text{mode}})(x^*, u^*))$ を●印で、また、実施スケジュールの評価の平均値 $\{\sum_{n=1}^{100} f(S(\hat{g}_n)(x^*, u^*))\}/100$ を＋印で示している。実施スケジュールについては、最小値 $\min_n \{f(S(\hat{g}_n)(x^*, u^*))\}$ と最大値 $\max_n \{f(S(\hat{g}_n)(x^*, u^*))\}$ も合わせて示してある。さらに、例題 I に対するケース A（非熟練者）およびケース C（熟練者）での計画スケジュールおよび実施スケジュールの一例を、それぞれ Fig. 5 および Fig. 6 に示す。

Fig. 4 より、まず、

(1) 計画段階では、いずれの例題に対しても、非熟練者（ケース A）によるスケジュールにおいて評価値が良く（小さく）なっていること

が確認できる。一方で、

(2) 実施段階になると、段取り時間の不確実性を考慮した熟練者（特にケース C）のほうの評価値（平均値や最悪値）が良くなっていること

が確認できる。これは、熟練者に相当する設定の場合には、実施段階の不確実性を適切に予測し、計画段階でロバストなスケジュールを立案していることに起因するものである。この点について Fig. 5 および Fig. 6 で具体的にみると、非熟練者による計画スケジュール (Fig. 5 (a)) では、 M_3 での J_8-J_{10} 間と $J_{10}-J_2$ 間、 M_4 での J_4-J_6 間においてそれぞれ段取り時間が必要となるが、いずれも最頻値が小さく分散指標が大きい順序が採用されている ($g_{\text{mode}}=20, \Delta g=15$)。一方、熟練者による計画スケジュール (Fig. 6 (a)) では、 M_3 での J_4-J_{10} 間、 M_4 での J_8-J_2 間と J_2-J_6 間において、いずれも最頻値が多少大きくとも極めて小さい分散指標をもつ順序が採用されている ($g_{\text{mode}}=25$ あるいは $30, \Delta g=2$)。この結果、実施スケジュールでは、熟練者による場合 (Fig. 6 (b)) に計

Fig. 5. Schedules obtained by unskillful personnel (Case-A). (a) Schedule generated beforehand (Planning phase), (b) Resultant schedule (Randomly sampled).

Fig. 6. Schedules obtained by experienced personnel (Case-C). (a) Schedule generated beforehand (Planning phase), (b) Resultant schedule (Randomly sampled).

画スケジュールからのずれ（遅れ）が少ないのに対して、非熟練者の場合 (Fig. 5 (b)) にはずれが大きくなってしまっていることが確認できる。

これらは、不確実性に対して一定レベルのロバスト性を有するスケジュールが得られているという点において、熟練者および非熟練者による意思決定過程の数理計画モデルの可能性・有用性を示唆する結果であると考えられる。

5. まとめ

本論文では、鉄鋼生産における計画立案問題として、段取り時間に不確実性を有するスケジューリング問題を対象に、熟練者と非熟練者の意思決定モデルの基本的考え方を提示するとともに、その数理計画モデルの構築を通して、熟練者エージェント構築への一アプローチ手法を提案した。また、単純な例題を用いた計算結果を示し、提案モデル（アプローチ）の可能性・有用性を確認した。ここで示した結果は、熟練者モデルの非熟練者モデルに対する有効性の一例ではあるが、本論文で前提として与えた認識・予測部分も意思決定部分と同等、あるいはそれ以上に重要な役割を担うものであると考えられる。この部分のモデル化を含め、熟練者エージェントの機能を充実させていくことが今後の課題である。

最後に、本論文で示した計算例について、神戸大学大学院システム情報学研究科博士課程前期課程の亀田浩志君にプログラムの作成から計算結果の整理まで尽力いただいた。ここに謝意を表するものである。

文 献

- 1) K.Itoh: *CAMP-ISIJ*, **20** (2007), 938.
- 2) H.Tamaki: *CAMP-ISIJ*, **21** (2008), 934.
- 3) N.Fujii, I.Hatono and H.Tamaki: *CAMP-ISIJ*, **22** (2009), 1102.
- 4) H.Tamaki, S.Sugikawa and H.Kameda: *CAMP-ISIJ*, **23** (2010), 634.
- 5) A.Allahverdi, C.T.Ng, T.C.E.Vheng and M.Y.Kovalyov: *Euro. J. Operation. Res.*, **187** (2008), 985.
- 6) A.Bem-Tal, L.E.Ghaoui and A.Nemirovski: *Robust Optimization*, Princeton Univ. Press, New Jersey, (2009), 3.
- 7) H.Aytug, M.A.Lawley, K.McKay, S.Mohan and R.Uzsoy: *Euro. J. Operatio. Res.*, **161** (2005), 86.
- 8) M.L.Pinedo, *Scheduling: Theory, Algorithms, And Systems*, Springer, New York, (2008), 13.