プロジェクトのスタビリティ向上のためのスケジュール修正方法*

森田 大輔[†]・諏訪 晴彦[‡]

A Schedule Revision Method to Enhance Project Stability*

Daisuke MORITA[†] and Haruhiko SUWA[‡]

In this paper, we propose a schedule revision method to enhance the project stability which is calculated based on the deviation between the actual activity starting time and the planned one. The proposed method revises the schedule by shrinking duration of the activities which start over the period in order to prevent the schedule from the activity delays. In the proposed method, the activity durations are shrunk so that the current schedule corresponds to the baseline schedule. In computational experiments, the proposed method is compared with some other revision methods in regard to the actual makespan and the activity delay. The experimental results indicate the effectiveness of the proposed method in the viewpoint of the project stability.

1. はじめに

現実のプロジェクトでは、それに係る費用や期日の観点から、計画段階ではプロジェクト完了時間（メイクスパン）最小化のもとでプロジェクト・スケジュールが立案される。いったんプロジェクトが動き始めると、プロジェクトの完了期日を遵守することが至上命令となる。一方、プロジェクトには作業所要時間の見積もり誤差や作業者の欠勤など様々な不確実性が存在[1]し、そのようなプロジェクトの不確実性が顕在化すると、作業遅延が発生し、結果として当初のスケジュールに従ったプロジェクトの実施が困難になることが少なくない。そのため、不確実な環境下では、作業遅延を考慮してプロジェクト・スケジュールの立案を行うとともに、プロジェクトの実施過程において進捗状況を監視し、必要に応じてスケジュールを修正することが重要となる[2]。

著者らはこれまでに、プロジェクト・スケジュールの立案段階に着目し、作業開始時刻のずれに関する指標であるスタビリティを導入したうえで、メイクスパン最小化を指向しつつも、プロジェクトをスケジュール通りに実行するための手法を提案している。具体的には、計画段階での見積もりからスタビリティの期待値を算出し、期待値の最小化を目的とした作業所要時間や工数の決定方法を提案している[3,4]。このような計画段階での不確実性への対応は、見積もりの確度が高い状況下において有用である。一方で、当初の見積もりよりも大きな遅延が生じた状況下では、プロジェクトのスタビリティが大きく低減する可能性が高まるため、プロジェクト実行過程でのスケジュール修正が必然となる。

そこで本研究では、プロジェクトを予定通りに安定して実施するためのスタビリティを指向したスケジュールの修正方法を新たに提案する。提案手法では、プロジェクトの進捗状況を把握する時点（以下、点検時点）において各作業の所要時間を短縮することにより修正を行う。はじめに点検時点から修正範囲までの作業を対象として、サブネットワークを生成し、最後尾となる作業を特定する。つぎに、特定した作業の遅延がなくなるように、サブネットワーク上の作業の所要時間を短縮する。このようにスケジュールの修正を行うことにより、修正範囲以降の作業遅延が解消され、プロジェクトの安定した実施が期待できる。数値実験では、提案手法の有用性をプロ

* 原稿受付 2016年7月22日
第60回システム制御情報学会研究発表講演会にて発表(2016年5月)

[†] 高千穂大学 経営学部 Faculty of Business Administration, Takachiho University; 19-1, Ohmiya 2chome, Suginami-ku, Tokyo 168-8508, JAPAN

[‡] 摂南大学 機械工学科 Department of Mechanical Engineering, Setsunan University; 17-8, Ikeda-naka-machi, Neyagawa, Osaka 572-8508, JAPAN

Key Words: project management, uncertainty, schedule revision, stability.

プロジェクトのメイクスパンと作業開始時刻の遅延の観点から明らかにする。

2. 関連研究

これまでに不確実性を考慮してプロジェクト・スケジュールを立案するためにさまざまな手法の研究が行われている。Vonderらは、スケジュールのスタビリティに関する評価尺度の最小化を目的としたヒューリスティックなスケジューリング手法を提案している [5]。また、著者らはこれまでに計画段階でスケジュールのスタビリティを高めることを目的として、作業所要時間や工数の見積もり法を提案している [3,4]。Lambrechtsらは、各作業の余裕時間に基づいた評価尺度を導入し、評価尺度の最大化を目的としたタブーサーチに基づくスケジューリング手法を提案している [6]。

一方、進捗管理に関しては、EVM(Earned value management)やCC/BM(Critical chain/ buffer management)におけるバッファ管理を中心として種々の研究が行われている [7-9]。EVMの分野では、プロジェクトにかかる費用やメイクスパンをより正確に予測するための手法や枠組みが提案されている [10-12]。CC/BMに関する研究では、スケジュールに配置するバッファのサイズを決定するための手法が提案されている [13,14]。その一方で、実際のプロジェクトにCC/BMを適用する際に生じるいくつかの問題点も指摘されている [15]。

EVMやCC/BM以外の枠組みで、プロジェクトの進捗管理に取り組んでいる研究として、Vonderらが複数の優先ルールを組み合わせて、スケジュールの変更案を生成する手法を提案している [16]。また、Zhuらはプロジェクトを構成する作業のうち一つだけが遅延するという状況で、最適なスケジュール修正を行う手法を提案している [17]。上記の通り、プロジェクトの進捗管理に関する研究は活発に行われているものの、議論の中心は未処理の作業に対するスケジューリング手法である。しかしながら、効果的なスケジューリング手法であっても、適切な修正時期に修正すべき作業を対象として行われなければその効果を十分に発揮することは難しい。したがって、スケジュールを修正する際には、スケジューリング手法のみならず、修正する時期や修正する作業をいかに決定するかが重要といえる。本研究では、修正時期や修正する作業を決定するための指針を確立する端緒として、スタビリティを指向するスケジュールの修正方法を新たに提案する。

3. 対象問題

3.1 計画段階におけるスケジュール立案

本研究で対象とするプロジェクトは N 個の作業に、架空の作業 0 および作業 $N+1$ を加えた作業集合 $\mathcal{A} = \{0, 1, \dots, N, N+1\}$ で構成される。各作業間には技術的な先行関係が存在し、作業 i が開始するまでに完了しな

ければならない作業の集合を $\mathcal{P}_i$ とする。プロジェクトの実施には N_R 種類の資源 $k \in \mathcal{R} = \{1, \dots, N_R\}$ が必要であることとする。各資源 k の利用可能量は一定であり、単位時間あたりに R_k だけ与えられている。また、各作業 i の開始から完了までには d_i 単位時間だけ要し、作業の実施には単位時間あたりに r_{ik} だけ資源を消費することとする。プロジェクトのスケジュールは資源制約付きプロジェクト・スケジューリング問題 (Resource constrained project scheduling problem; RCPSP) の枠組み [18] でメイクスパンの最小化を目的として立案することとした。

3.2 実行段階におけるスケジュール修正

3.2.1 アプローチと仮定

立案されたスケジュールの実施過程において作業遅延が生じた際には、作業 i の実際の開始時刻 S'_i が予定の開始時刻 S_i よりも遅れてしまい、予定通りのプロジェクトの実施が困難となることが少なくない。そこで本研究では、つぎの二つの評価尺度、すなわち、プロジェクトの実際のメイクスパン

$$F_1 = \max_{i \in \mathcal{A}} S'_i \quad (1)$$

および、作業遅延量

$$F_2 = \sum_{i \in \mathcal{A}} (S'_i - S_i) \quad (2)$$

を取り上げる。スケジュール修正の際に、作業 i の所要時間は $d_i^{\min}$ まで短縮可能とする ($1 \leq d_i^{\min} \leq d_i$)。所要時間の短縮には追加資源を必要としないが、一単位時間の短縮には c_i (> 0) の費用がかかることとする。

対象とするプロジェクトには、予算 B があらかじめ与えられていることとする。ここでの予算 B は、スケジュールの実施過程でスケジュール修正にかかる費用に使用される予算とし、修正費用の総和は予算 B を超過してはならないとする。

3.2.2 スケジュール修正問題

本研究では、スケジュール修正の方策として定期修正方策を対象とする。すなわち、プロジェクトの実行過程において、プロジェクト進捗の点検間隔を τ (> 0) とし、点検時点 $t = l\tau$ ($l = 1, 2, \dots$) において、 t 以降に開始予定の作業を対象としてスケジュール修正を実施することとする。このような作業の集合を $\mathcal{B}_t \subseteq \mathcal{A}$ とする。点検時点 t ではすでにプロジェクト遅延が生じている可能性があり、作業 $i \in \mathcal{B}_t$ の予定開始時刻および所要時間をそれぞれ、 S_i^t ($\geq S_i$) および d_i^t ($\geq d_i$) で表す。また、時刻 t までに開始している作業の集合を $\mathcal{A}_t$ とする。

時刻 t においてスケジュール修正を行う問題は、作業 $i \in \mathcal{B}_t$ の実際の開始時刻を表す確率変数を $\tilde{S}_i$ として、評価尺度 F_2 を用いると以下のとおりに記述することができる。

$$\min \sum_{i \in \mathcal{B}_t} E[\tilde{S}_i - S_i^t] \quad (3)$$

$$\text{s.t. } S_i^t = \max(\max_{j \in \mathcal{P}_i \cup \mathcal{P}_i^R} (S_j^t + d_j^t), S_i) \quad (i \in \mathcal{B}_t) \quad (4)$$

$$d_i^t = d_i + v_i^t - x_i \quad (i \in \mathcal{B}_t) \quad (5)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{B}_t} c_i x_i \leq B \quad (6)$$

$$x_i = d_i + v_i^t - d_i^{t-1} \quad (i \in \mathcal{A}_t) \quad (7)$$

$$x_i \in [0, d_i - d_i^{\min}] \quad (i \in \mathcal{B}_t) \quad (8)$$

この問題は、(3) 式の評価尺度の期待値を最小化することを目的として、作業 i の所要時間の短縮量 x_i を決定する問題である。時刻 t における作業 i の予定開始時刻 S_i^t および所要時間 d_i^t はそれぞれ (4) 式および (5) 式で与えられる。ただし、 $\mathcal{P}_i^R$ は、資源の競合によって生じた先行作業の集合であり、 v_i^t は時刻 t までに作業 i に発生した作業遅延量である。(6) 式はプロジェクトの予算に関する制約である。時刻 t までに開始している作業 $i \in \mathcal{A}_t$ の短縮量は、(7) 式で与えられる。(8) 式は、未処理の作業 $i \in \mathcal{B}_t$ の短縮可能量を表している。

(3) 式についてみると、不確実性の影響により、スタビリティ評価尺度の構造を明示的に表すことができない。そのため、(3)~(8) 式のスケジュール修正問題を直接解くことはできない。これは、評価尺度を F_1 とした際も同様である。そこで本研究では、次章でスタビリティを指向したヒューリスティックなスケジュールの修正方法を提案するとともに、提案手法の有用性を 5 章の数値シミュレーションを通して検討する。

4. スタビリティ指向のスケジュール修正

4.1 スケジュール修正の手順

本研究では、スタビリティを指向したスケジュール修正方法を新たに提案する。提案手法では、スケジュールに設けられた各点検時点において修正を考える。具体的には、はじめにスケジュール修正の時間幅を δ とし、点検時点 t において区間 $[t, t+\delta]$ に存在する作業群のみを対象としてアローダイアグラム（以下、サブネットワーク）を生成する。つぎに、サブネットワークにおいて最後尾の作業の遅延量が 0 となるように所要時間を短縮する。これによって、修正範囲以降の作業遅延が解消されるため、実際のメイクスパン F_1 および作業遅延量 F_2 に関して良好な結果が得られると考えられる。なお、提案手法における作業所要時間の短縮は、短縮費用を抑えつつ作業遅延を解消するために、最小カットに基づいて行うこととした。ただし、サブネットワークにおける最後尾の作業の完了時刻を早くするために短縮が必要となる作業群をカットとよび、その中で短縮費用が最小となるカットを最小カットとする。

提案手法の具体的な手順は以下の通りである。

Step 1 修正範囲 δ を決定し、 $t \leftarrow 0$ とする。

Step 2 期間 $(t, t+\tau]$ までの作業を実行する。これによ

Fig. 1 Example of project

り、すべての作業が完了したならば手順を終了する。そうでなければ、次の点検時点 $t \leftarrow t+\tau$ と更新する。

Step 3 時刻 t 以降で開始する作業を対象として、以下の手順を行うことにより、修正する作業と所要時間の短縮量を決定する。

- 1) 未処理の作業の中で $S_i \leq t+\delta$ となる作業のみで構成されるサブネットワークを生成する。
- 2) サブネットワーク上において、後続作業をもたない作業 i の遅延量 $S_i^t - S_i$ を算出し、遅延量が最大となる作業を特定する。
- 3) 特定した作業に対して余裕時間をもつ作業と先行関係のない作業をサブネットワークから取り除く。
- 4) サブネットワークにおけるカット集合を算出し、カット集合内から最小カットに対応する作業集合 $\mathcal{C}^*$ を特定する。
- 5) 作業 $i \in \mathcal{C}^*$ の所要時間を 1 単位時間だけ短縮することにより予算を違反する、あるいは特定した作業の遅延量が 0 ならば **Step 4**へ。そうでなければ実際に短縮して 1) へ戻る。

Step 4 期間 $(t, t+\tau]$ で開始予定の作業の所要時間を **Step 3** で得られた結果に従って実際に短縮して、**Step 2** へ戻る。

4.2 提案手法の適用例

ここで、プロジェクト実行中に作業遅延が生じたときに、提案手法を用いて修正を行うことを考える。ここでは、Fig. 1 に示す作業数 $N=10$ であるプロジェクトを取り上げる。プロジェクトが利用する資源の種類 $N_R=1$ とし、利用可能な資源量 $R_1=4$ とした。プロジェクトに対するスケジュールの一例を Fig. 2 に示す。資源制約を考慮しなければ、プロジェクトのメイクスパンは 11 になるが、資源制約によって作業 3、5 と作業 9、10 を同時に処理することができなくなり、スケジュールのメイクスパンは 14 となっている。

提案手法における点検間隔と修正範囲は、 $\tau=\delta=5$ とした。Fig. 3 のように、スケジュールの実行過程で作業 1 に対して 2 単位時間だけ遅延が生じた場合、時刻 $t=5$ で作業 4 から作業 8 までを対象としてスケジュールの修

Fig. 2 Baseline schedule

Fig. 3 Activity delay

Fig. 4 Sub network

正を考えることとなる。修正対象の作業の先行関係から Fig. 4 のサブネットワークが生成される。サブネットワーク上のアローの部分が作業を表している。ただし、破線のアローはダミーとよばれる作業の先行関係を表すために追加される架空の作業である。サブネットワークにおいて後続作業を持たない作業 4 および作業 8 の遅延量 $S_i^t - S_i$ はそれぞれ 0 および 2 であるため、作業 8 とその先行作業を対象とする。カットの集合 C は作業 5, 作業 6, 7 および作業 8 の 3 パターンであり、短縮にかかる費用が最小となるカットは Fig. 1 の短縮費用から作業 5 となる。作業 8 の遅延量が 0 となるまで短縮を行う場合、作業 5 が短縮され、作業 5 のつぎに短縮費用の小さい作業 6 および作業 7 がそれぞれ一単位時間ずつ短縮される。結果として Fig. 5 のようなスケジュールが得られることとなる。作業 8 の遅延量がなくなるように作業所要時間を短縮しているため、それ以降の作業 9 および作業 10 の開始時刻が Fig. 2 のプロジェクト・スケジュールと一致する結果となっている。提案手法では、修正によって得られたスケジュールに従ってプロジェクトを実行し、つぎの時刻 $t=10$ で再びスケジュールの遅延に応じて修正を検討する。なお、Fig. 1 の問題例に対して提案手法を用いた場合、1 秒未満で修正結果を出力することが可能である。

Fig. 5 Revised schedule

5. 数値実験

5.1 実験条件

提案手法の有用性を考察するために数値実験を行った。数値実験では、PSPLIB[19] から作業数 $N=120$ である 60 種類のプロジェクト問題例を取り上げた。PSPLIB の各問題例に対して、メイクスパン最小化を目的としたタブーサーチ [20] を適用し、プロジェクト・スケジュールを立案した。立案されたスケジュールを PSPLIB における現時点での最良解と比較した結果、最良解と一致するスケジュールは 13 種類であり、タブーサーチによる解と最良解との相対誤差の平均は 11.7% であった。

プロジェクトの実施過程で、各作業の所要時間に生じる遅延は PERT[21] や複数の文献 [22,23] で利用されているベータ分布に従うこととした。作業 i の遅延量を確率変数 X_i で表すと X_i の確率密度関数は、遅延の最大値を決定するパラメータ η を用いて

$$f_{X_i}(x) = \frac{1}{B(p,q)} \frac{x^{p-1}(\eta d_i - x)^{q-1}}{(\eta d_i)^{p+q-1}} \quad (9)$$

とする。なお、 $B(p,q)$ はパラメータ p および q のベータ関数であり、

$$B(p,q) = \frac{(p-1)!(q-1)!}{(p+q-1)!} \quad (10)$$

で与えられる。本研究では、作業遅延を生じさせることを考慮し、ベータ分布の右側の裾野が長くなるようパラメータ $(p,q)=(2,4)$ とした。計画段階で与えられる各作業 i の所要時間 d_i はベータ分布における期待値で与えることとした。

スケジュールに設けられる点検時点の数 $N^\tau=8,10,12$ とし、点検時点の間隔 $\tau=S_{N+1}/N^\tau$ で与えた。各点検時点において作業 i の所要時間を最大で 25%、すなわち $d_i^{\min}=3d_i/4$ まで短縮できることとし、一単位時間短縮することによって生じる費用 c_i は区間 $[1,20]$ の一様分布に従う乱数で与えた。プロジェクトに与えられる予算は、予算を決定するための比率である B_r を用いて $B=B_r \sum_{i \in \mathcal{A}} c_i (d_i - d_i^{\min})$ で与えることとした ($B_r=0.10, 0.15, 0.20$)。以上の実験条件のもとで、所要時間に関するパラメータ η 、予算を決める比率 B_r 、点検時点の数 N^τ および問題例を組み合わせた 1,080 ケースに対してそれぞれ 100 回の数値シミュレーションを行った。

Fig. 6 Actual makespan (j120-1-1)

Fig. 7 Activity delay (j120-1-1)

5.2 修正区間と作業遅延

スケジュール修正の範囲 δ は各点検時点で修正する作業を決定するため、提案手法において重要なパラメータである。そこで、感度分析的アプローチにより、修正範囲 δ によるスタビリティ評価尺度の変化を調べる。

スケジュールの修正範囲を点検間隔の整数倍、すなわち自然数 n を用いて $\delta = n\tau$ で与えるものとする。ここで、 $n = 1, \dots, 12$ としたときの実際のメイクスパンと作業遅延量の振る舞いを Fig. 6 および Fig. 7 に示す。Fig. 6 の実際のメイクスパンは、修正範囲を広げるとともに減

少していき、一定値を超えると停滞する傾向がみられる。作業遅延量に関しても、Fig. 7 の結果から、修正範囲を広げることにより作業遅延量が減少する傾向がみられる。ただし、パラメータ n が一定値を超えるとメイクスパンとは異なり、作業遅延量が増加するという結果になっている。これは、修正範囲を大きくすることによりスケジュールの後半で開始予定の作業を修正する可能性が高まるためであると考えられる。スケジュール後半の作業の所要時間を短縮しても、短縮によって開始時刻の遅延が解消される後続作業の数はスケジュール前半と比較し

Table 1 Simulation result (Activity delay)

η	B_r	N^τ	Average					Rel. Error			
			Pmin	P*	Pmax	(A)	(B)	Pmin	P*	Pmax	(B)
1.5	0.10	8	4746.5	4812.3	4955.4	3992.6	6660.0	18.9%	20.5%	24.1%	66.8%
		10	4317.5	4468.5	4659.3	3404.8	6660.0	26.8%	31.2%	36.8%	95.6%
		12	4022.3	4244.1	4470.7	2961.6	6660.0	35.8%	43.3%	51.0%	124.9%
	0.15	8	4752.8	4717.9	4809.2	3872.9	6660.0	22.7%	21.8%	24.2%	72.0%
		10	4300.3	4331.1	4478.3	3261.7	6660.0	31.8%	32.8%	37.3%	104.2%
		12	3983.8	4074.9	4264.5	2804.9	6660.0	42.0%	45.3%	52.0%	137.4%
	0.20	8	4799.0	4712.3	4756.6	3789.7	6660.0	26.6%	24.3%	25.5%	75.7%
		10	4337.2	4303.4	4393.3	3164.5	6660.0	37.1%	36.0%	38.8%	110.5%
		12	4010.3	4025.9	4157.7	2700.4	6660.0	48.5%	49.1%	54.0%	146.6%
2.0	0.10	8	7227.3	7258.2	7371.4	6382.5	9231.4	13.2%	13.7%	15.5%	44.6%
		10	6728.7	6820.4	6981.6	5693.9	9231.4	18.2%	19.8%	22.6%	62.1%
		12	6350.2	6509.5	6711.5	5156.9	9231.4	23.1%	26.2%	30.1%	79.0%
	0.15	8	7233.6	7159.8	7222.9	6259.9	9231.4	15.6%	14.4%	15.4%	47.5%
		10	6715.6	6684.1	6796.6	5543.9	9231.4	21.1%	20.6%	22.6%	66.5%
		12	6316.6	6339.2	6493.2	4986.1	9231.4	26.7%	27.1%	30.2%	85.1%
	0.20	8	7254.7	7130.4	7149.6	6182.5	9231.4	17.3%	15.3%	15.6%	49.3%
		10	6745.7	6636.0	6691.3	5450.4	9231.4	23.8%	21.8%	22.8%	69.4%
		12	6348.0	6272.7	6365.1	4879.6	9231.4	30.1%	28.5%	30.4%	89.2%

Table 2 Simulation result (Actual makespan)

η	B_r	N^τ	Average					Rel. Error			
			Pmin	P*	Pmax	(A)	(B)	Pmin	P*	Pmax	(B)
1.5	0.10	8	776.7	770.9	768.5	732.2	809.5	6.1%	5.3%	5.0%	10.6%
		10	764.9	759.1	757.5	717.3	809.5	6.6%	5.8%	5.6%	12.9%
		12	754.7	750.0	749.5	707.0	809.5	6.7%	6.1%	6.0%	14.5%
	0.15	8	779.3	773.1	769.6	731.5	809.5	6.5%	5.7%	5.2%	10.7%
		10	767.9	760.8	757.7	716.4	809.5	7.2%	6.2%	5.8%	13.0%
		12	757.7	751.1	749.1	706.0	809.5	7.3%	6.4%	6.1%	14.7%
	0.20	8	780.7	774.6	770.9	730.9	809.5	6.8%	6.0%	5.5%	10.7%
		10	769.4	762.8	759.0	715.8	809.5	7.5%	6.6%	6.0%	13.1%
		12	759.1	753.0	749.9	705.3	809.5	7.6%	6.8%	6.3%	14.8%
2.0	0.10	8	827.9	821.9	818.8	777.3	859.1	6.5%	5.7%	5.3%	10.5%
		10	816.5	809.4	806.7	760.2	859.1	7.4%	6.5%	6.1%	13.0%
		12	806.1	798.9	796.9	747.9	859.1	7.8%	6.8%	6.6%	14.9%
	0.15	8	829.9	823.8	820.2	776.6	859.1	6.9%	6.1%	5.6%	10.6%
		10	819.0	811.4	807.6	759.2	859.1	7.9%	6.9%	6.4%	13.2%
		12	808.6	800.9	797.2	746.6	859.1	8.3%	7.3%	6.8%	15.1%
	0.20	8	831.1	825.5	821.6	776.1	859.1	7.1%	6.4%	5.9%	10.7%
		10	820.6	813.6	809.0	758.6	859.1	8.2%	7.2%	6.6%	13.3%
		12	810.5	803.1	798.6	745.8	859.1	8.7%	7.7%	7.1%	15.2%

て相対的に少なくなる。以上のことから、本実験で対象とするプロジェクトの条件下では、修正範囲を点検間隔の2倍から4倍程度（ $2\tau, \dots, 4\tau$ ）で与えるとメイクスパンと作業遅延量に関して良好な結果が得られるが、それ

よりも大きくすると作業遅延が増加する傾向があるといえる。

5.3 比較検証

つぎに、提案手法の性能を評価するために以下の二つの方法を取り上げ、比較実験を行った。

(A) 作業遅延量が完全既知の状況で、メイクスパン最小化を目的とした修正を行う。

(B) 遅延を放置しスケジュール修正を行わない。

手法 (A) は、各作業に発生する作業遅延量が既知である状況下で修正を行うため、メイクスパンが最小値となる。具体的には、スケジュール修正を行わないで得られた実施結果に対して、メイクスパンが最小となるように作業所要時間を短縮する。ただし、修正対象となる作業を提案手法と同様とするために、時刻 τ 以前に開始される作業は修正対象から除くこととした。提案手法では、3種類の修正範囲 $\delta = \tau, N\tau, 3\tau$ を取り上げ、おのおの、手法 $P^{\min}$, $P^{\max}$, および P^* とよぶこととした。

スケジュール修正を各手法で行った際に生じた作業遅延量を Table 1 に示す。Table 1 における Average は各問題例に生じた遅延量の平均値であり、Rel.Error は提案手法 3 種類のそれぞれの結果について手法 (A) による結果との相対誤差を表す。同様に、プロジェクトの実際のメイクスパンを Table 2 に示す。

Table 1 の各手法によって生じた作業遅延量についてみると、修正を行わない手法 (B) と比較して提案手法によって作業遅延が最大で 30% 程度軽減している結果となっている。こういった作業遅延の軽減は、遅延によって生じる在庫費用やスケジュールの変更にかかる時間的なコストの低減につながる。提案手法の中でも、修正範囲を狭くした手法 $P^{\min}$ および手法 P^* が良好な結果となっている。これは、修正範囲を小さく与えることにより、早いタイミングで作業遅延に対処できたためであると考えられる。しかしながら、点検時点数が大きい問題例では、手法 (A) との相対誤差が大きくなっている。そのため、点検時点数が増えて、相対的に点検間隔が狭くなった際の修正方法に関しては今後検討が必要であると考えられる。

Table 2 についてみると、実際のメイクスパンに関しても手法 (B) よりも提案手法が低減している結果となっている。そのため本数値実験では、プロジェクトの延長にかかる費用の低減やプロジェクトの期日の遵守といった観点からも提案手法が有用であると考えられる。提案手法の中でも、とくに手法 $P^{\max}$ が良好な結果となっている。これは、ほかの手法よりも広い範囲でスケジュールの修正を考えるため、短縮費用に関して効率的に修正できたのだと考えられる。手法 (A) との誤差も 5~7% 程度であり比較的良好な結果であるといえる。

以上をまとめると、メイクスパンに関しては手法 $P^{\max}$ が良好な結果となり、手法 (A) との誤差も作業遅延量と比較して小さい値であった。作業遅延量に関しては、点検間隔を狭くすると手法 (A) との差が大きくなったものの、それ以外の状況では修正範囲を狭くした手法 $P^{\min}$

および手法 P^* によって比較的良好な結果が得られた。そのため本数値実験において、提案手法は修正範囲を適切に与えると、安定したスケジュールの実施とプロジェクトの早期完了に貢献するスケジュール修正方法であるといえる。

6. おわりに

本研究では、プロジェクト進捗管理におけるスケジュール修正の問題に着目し、プロジェクトを予定通りに安定して実施するための修正時期および修正対象の作業を決定する方法を提案した。数値実験では、提案手法に加えて 2 種類の手法を取り上げ、作業遅延量とメイクスパンに関して比較を行った。数値実験の結果、実際のメイクスパンに関しては問題例にかかわらず、提案手法を適用することにより良好な結果が得られた。作業遅延量に関しては、点検間隔を狭くした問題例に関して課題が明らかとなったものの、それ以外の状況では提案手法によって比較的良好な結果が得られた。今後の課題としては、大規模な問題例への適用や修正範囲 δ の適切な決定方法が挙げられる。

参考文献

- [1] A. D. Meyer, C. H. Loch and M. Tisch: Managing project uncertainty: from variation to chaos; *MIT Sloan Management Review*, Vol. 43, No. 2, pp. 60–67 (2002)
- [2] W. Herroelen and R. Leus: Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials; *European Journal of Operational Research*, Vol. 165, No. 2, pp. 289–306 (2005)
- [3] D. Morita and H. Suwa: A method for activity duration estimation based on project stability; *Electronic Proceedings of 2012 International Symposium on Flexible Automation*, 6 pages (2012)
- [4] 森田, 諏訪: プロジェクト管理におけるスタビリティを指向する作業の工数見積もり法; システム制御情報学会論文誌, 第 28 巻, 第 9 号, pp. 384–391 (2015)
- [5] S. V. Vonder, E. Demeulemeester and W. Herroelen: Proactive heuristic procedures for robust project scheduling: An experimental analysis; *European Journal of Operational Research*, Vol. 189, pp. 723–733 (2008)
- [6] O. Lambrechts, E. Demeulemeester and W. Herroelen: A tabu search procedure for developing robust predictive project schedules; *International Journal of Production Economics*, Vol. 111, pp. 493–508 (2008)
- [7] F. Anbari: Earned value method and extensions; *Project Management Journal*, Vol. 34, No. 4, pp. 12–23 (2003)
- [8] E. M. Goldratt: *Critical Chain*, The North River Press (1997)
- [9] R. C. Newbold: *Project Management in the Fast Lane: Applying the Theory of Constraints*, CRC Press

- (1998)
- [10] F. Caron, F. Ruggeri and A. Merli: A Bayesian approach to improve estimate at completion in earned value management; *Project Management Journal*, Vol. 44, No. 1, pp. 3–16 (2013)
 - [11] D. F. Cioffi: Designing project management: A scientific notation and an improved formalism for earned value calculations; *International Journal of Project Management*, Vol. 24, No. 2, pp. 136–144 (2006)
 - [12] R. Howes: Improving the performance of earned value analysis as a construction project management tool; *Engineering, Construction and Architectural Management*, Vol. 7, No. 4, pp. 399–411 (2000)
 - [13] M. Fallah, B. Ashtiani and M. B. Aryanezhad: Critical chain project scheduling: Utilizing uncertainty for buffer sizing; *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, Vol. 3, No. 3, pp. 280–289 (2010)
 - [14] O. I. Tukul, W. O. Rom and S. D. Eksioğlu: An investigation of buffer sizing techniques in critical chain scheduling; *European Journal of Operational Research*, Vol. 172, No. 2, pp. 401–416 (2006)
 - [15] W. Herroelen and R. Leus: On the merits and pitfalls of critical chain scheduling; *Journal of Operations Management*, Vol. 19, pp. 559–577 (2001)
 - [16] S. Van de Vonder, F. Ballestin, E. Demeulemeester and W. Herroelen: Heuristic procedures for reactive project scheduling; *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 52, No. 1, pp. 11–28 (2007)
 - [17] G. Zhu, J. F. Bard and G. Yu: Disruption management for resource-constrained project scheduling; *The Journal of the Operational Research Society*, Vol. 56, No. 4, pp. 365–381 (2005)
 - [18] S. Hartmann and D. Briskorn: A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem; *European Journal of Operational Research*, Vol. 207, No. 1, pp. 1–14 (2010)
 - [19] R. Kolisch and A. Sprecher: PSPLIB – A Project Scheduling Problem Library; *European Journal of Operational Research*, Vol. 96, No. 1 pp. 205–216 (1997)
 - [20] K. Nonobe and T. Ibaraki: Formulation and tabu search algorithm for the resource constrained project scheduling problem; C. C. Ribeiro and P. Hansen, editors. *Essays and Surveys in Metaheuristics*, Kluwer Academic Publishers, pp. 557–588 (2002)
 - [21] D. G. Malcolm, J. H. Roseboom and C. E. Clark: Application of a technique for research and development program evaluation; *Operational Research*, Vol. 7, No. 5, pp. 646–669
 - [22] Y. W. Tsai and D. D. Gemmill: Using tabu search to schedule activities of stochastic resource-constrained projects; *European Journal of Operational Research*, Vol. 111, pp. 129–141 (1998)
 - [23] F. Deblaere, E. Demeulemeester and W. Herroelen: Proactive policies for the stochastic resource-constrained project scheduling problem; *European Journal of Operational Research*, Vol. 214, pp. 308–316 (2011)

著者略歴

もり た だい すけ
森 田 大 輔 (正会員)

2008年3月摂南大学工学部マネジメントシステム工学科卒業, 2010年3月摂南大学大学院工学研究科(機械・システム工学専攻)修了, 2013年3月同大学大学院工学研究科(創生工学専攻)修了, 摂南大学工学部機械工学学科研究生(～2014年3月)。2014年4月より高千穂大学経営学部助教。おもにプロジェクト・マネジメントの時間管理技法, 生産能力計画など製造活動に関わる計画の研究に取り組んでいる。

す わ はる ひこ
諏 訪 晴 彦 (正会員)

1997年3月神戸大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了。同年4月摂南大学工学部経営工学科講師, 2002年4月同学部マネジメントシステム工学科助教授, 2010年4月摂南大学理工学部機械工学学科教授となり, 現在に至る。2012年8月マサチューセッツ工科大学製造生産性研究所客員研究員(～2013年9月, 2014年7月)。エネルギー高効率な製造システムの方法論, 工作機械の高度知能化技術, 生産スケジューリングの研究に取り組んでいる。2008年スケジューリング学会学術賞受賞。アメリカ機械学会, 日本機械学会, 精密工学会, 計測自動制御学会などの会員。