

不確実性環境下でのプロジェクト・タイムマネジメント
— クリティカルチェーン・スケジューリングとその最適化モデル —¹
Project Time Management under Uncertainties
- Critical Chain Scheduling and Its Optimization Models -

諏訪晴彦² 摂南大学理工学部 機械工学科

森田大輔 高千穂大学経営学部

SUWA, Haruhiko Faculty of Science and Engineering
Department of Mechanical Engineering,
Setsunan University

MORITA, Daisuke Faculty of Business Administration,
Takachiho University

Abstract

This paper deals with decision-making processes of project time management with uncertainties, and focuses on what we call “critical chain scheduling” which has been recognized as an epoch-making way of project time management, leading a project to a successful conclusion. Critical chain scheduling is just a framework of construction of project schedule and its control at the project execution phase, therefore it is not always used in practice in a rational way. We have proposed a novel theoretical approach of critical chain scheduling based on a minimal perturbation strategy that can cope with uncertainties occurring at the execution phase of the project management. In this paper, the models of project scheduling considering the presence of uncertainties are reviewed, and then our proposed methods and the conventional critical chain and buffer management are compared to clarify the novelty of our approach.

キーワード: プロジェクト管理, 不確実性, クリティカルチェーン, 数理計画, 最適化問題

Keywords : project time management, uncertainty, critical chain, mathematical programming, optimization problem

1. はじめに

プロジェクトとは一般に「事業目標を達成するために期間を限定して一度だけ行われる一連の作業」と定義される。製品, 人材, 組織やシステムの開発や建設など多種多様な生産

¹ 【原稿受付】2018年8月1日, 【掲載決定】2018年9月20日

² 【主著者連絡先】諏訪晴彦 摂南大学・教授 e-mail:suwa@mec.setsunan.ac.jp
〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町17-8, 摂南大学理工学部機械工学科

活動のプロジェクトをスムーズに実行し完遂するためには、プロジェクトを適切に管理すること、すなわちプロジェクトマネジメント⁽¹⁾が肝要となる。プロジェクトの立案段階では、作業情報と資源計画に基づいてプロジェクトのスケジュールが立案される。ところがプロジェクトの実行過程では“必ず”作業遅延が生じ、いずれはプロジェクト全体の遅延へと波及する。このようなプロジェクトの摂動は、追加の費用や資源の投入を招き、最悪の場合はプロジェクトが失敗となる恐れもある。プロジェクトマネジメントにおいて、不確実性の存在を予見し、かつ作業遅延に適応するための工学的問題解決が不可欠である。

本論文では、プロジェクトマネジメント（以下、PM）において、その根幹をなすプロジェクト・タイムマネジメント、すなわちプロジェクトの計画立案および時間管理の意思決定プロセスに焦点を絞り、不確実性を陽に考慮したプロジェクト・スケジューリングのアプローチや最適化手法を俯瞰する。その上で、従前研究との比較考察を通じて、著者らが提案した時間バッファに基づくクリティカルチェーンスケジューリング技法のとくに最適化モデルについてその有用性を論じる。

2. プロジェクト・スケジューリング

2-1 プロジェクト・タイムマネジメント

現実のPMでは、管理運用の手段として、「使いこなし」のレベルに応じて、マニュアル管理、表計算ソフト、プロジェクト管理ソフトがほとんど多くの場合に用いられる。表計算ソフトは実質的にはMicrosoft Excelを指し、数人程度の小規模なプロジェクトであればExcelで十分といわれるが、後述のプロジェクトのクリティカルチェーンを管理することは極めて困難である。本格的なプロジェクト管理ソフトとしては、Microsoft ProjectやPrimavera P6 Professional Project Managementなどが用いられる。プロジェクトとそれにかかる予算の規模に応じて、プロジェクト管理ソフトの巧みな使いこなしが肝要である。

グローバルな視座では、分野を問わずPMの立ち上げから消滅に至るまでの全てのプロセスは、PMI (Project Management Institute) によるPMBOK (Project Management Body of Knowledge)で規定されている⁽¹⁾。PMBOKは国際標準規格ではないが、PMに関する事実上の世界標準の知識体系として認知されている。本稿で取り上げるプロジェクト・タイムマネジメントは、PMBOKにおけるプロセスの一つとして明確に位置付けられ、(1)作業の定義、(2)作業の先行関係、(3)作業の利用資源量の見積り、(4)作業の所要時間の見積、および(5)プロジェクトスケジュールの生成の五つのサブプロセスを対象とする。これらサブプロセスのうち、(1)と(2)は実質的には上流のマネジメントにおける作業構成明細 (Work Breakdown Structure)の構築の範疇であるため除外するとすれば、プロジェクトの立案段階における意思決定プロセスとしてのプロジェクト・スケジューリングは、(3)、(4)および(5)の三つのサブプロセスが対象となる。

伝統的かつ最も基本的なPERT/CPM (Project Evaluation and Review Technique/Critical Path Method)⁽²⁾では、上記サブプロセスの(1)から(4)はすべて既知とし、かつ(5)では資源の利用上限を無視した上で、山崩し法⁽³⁾といった簡単なヒューリスティクスでプロジェクトスケジュー

³開始可能時刻で割り付けた作業群のいくつかを、利用資源量の制約を違反しない範囲で時間軸の増大方向にずらす方法。

ールを生成する．資源の利用上限を陽に考慮する場合は，後述の RCPSP (Resource Constraint Project Scheduling Problems) ⁽²⁾ と呼ばれるプロジェクト・スケジューリング問題の一般的枠組みで検討することとなる．

2-2 基本モデルと解法

RCPSP を定義する．プロジェクトは N 個の作業 (作業集合 $A = \{1, \dots, N\}$) と N_R 種類の資源 k (資源集合 $R = \{1, \dots, N_R\}$) で構成されるものとする．各資源 $k \in R$ の利用量の上限は時間に関係なく一定とし，単位時間あたりに最大 R_k を利用できるとする．スケジュール π_0 上での作業 $i \in A$ の所要時間および開始時刻を d_i および S_i^0 とし，完了時刻を $C_i^0 (= S_i^0 + d_i)$ で表すこととする．作業 i の資源 k の資源要求量を r_{ik} とする．また，作業 i を開始するまでに完了せねばならない作業 (先行作業) の集合を P_i とする．すなわち，作業 i と作業 $j \in P_i$ には先行関係 $i \rightarrow j$ がある．同様に，作業 i が完了するまでは開始できない作業 (後続作業) の集合を Q_i とするさらにプロジェクトの完了を示す架空の作業 $N+1$ ($P_{N+1} = \{i | Q_i = \emptyset\}$) を導入しておく．

プロジェクトの時間軸上において，時間区間 $[t-1, t)$ ($t = 1, 2, \dots$) を期間 t と呼び，期間 t で処理中の作業集合を $A_t = \{i | S_i^0 \leq t \leq C_i^0\}$ とする．プロジェクトの当初立案されるスケジュール π_0 の最大完了時刻 (以下，メイクスパンと呼ぶ) を T_0 とする．

以上の準備の下，当初スケジュール π_0 を生成するための RCPSP は，次のとおり定式化される．

$$\text{Minimize } C_{N+1}^0 \quad (1)$$

$$\text{Subject to } \sum_{i \in A_t} r_{ik} \leq R_k, \quad (k = 1, \dots, N_R; t = 1, \dots, T_0) \quad (2)$$

$$C_i^0 \leq S_j^0, \quad (j \in Q_i) \quad (3)$$

$$S_i^0 \geq 0. \quad (i \in A) \quad (4)$$

上記の問題において，(1)は π_0 のメイクスパンを表し，(2)式は資源利用量の制約条件を，また(3)はスケジュールの実行可能性を保持する制約式を表している．この定式化に基づいて，不確実性に対応する意思決定モデルを論じていくこととする．

RCPSP の解法について触れておく．RCPSP はいわゆる NP 困難 (non-deterministic polynomial hard) な組合せ最適化問題であるが，昨今の計算機環境からすれば，数十作業程度のプロジェクトであれば，分枝限定法や動的計画法などの (スケジュールの最適性が保証されるという意味での) 厳密最適化手法⁽²⁾の適用を検討すべきであろう．仮に最適スケジュールを実時間で生成できなくとも，スケジュール立案のアルゴリズムを設計・開発する上での指針を得ることができる．厳密最適化手法の適用が難しい場合は，切除平面やラグランジュ分解調整など対象問題を直接解くアプローチや，タブー探索，模擬アニーリングといったメタヒューリスティクスなどがある⁽²⁾．作業数が数百から千といった現実規模のプロジェクトスケジュールを実時間で求めるには精度の高いヒューリスティクスの開発が必要となる．本稿

では、最適スケジュールの導出に焦点を絞り、分枝限定法に基づく厳密最適化手法の構成を紹介する。

3. 不確実性への対応

3-1 クリティカルチェーン／バッファ管理

Eliyahu M. Goldratt の *The Goal: A Process of Ongoing Improvement* (1984)⁽³⁾ は世界的ベストセラーとなった生産管理小説である。この書籍の狙いは、著者が提唱する制約理論 (Theory of Constraints; TOC) に基づくプロジェクト管理の啓蒙である。通常、プロジェクトは作業群の多段かつ並列ネットワークで構成されるが、ネットワーク内の隘路 (ボトルネック) を識別し解消するアプローチを取る。TOC では、ボトルネックの偏在を認め、かつその解消はマネジメントの本質ではないという立場を取り、ボトルネックを軸にプロジェクトを遂行することを主張する。この管理手法は、PM では Critical Chain/Buffer Management (CC/BM)あるいは CCPM (Critical Chain Project Management)⁽⁴⁾、生産管理では DBR (Drum-Buffer-Rope) と呼ばれている。クリティカルチェーンは、プロジェクトスケジュールの長さを規定する作業 (クリティカル作業) の連続であり、プロジェクト・ネットワークの始まりから終わりに至る最長経路に相当する。つまり、PERT/CPM でいうところのクリティカルパスと同義である。

当初スケジュール π_0 において、次の(5)および(6)式を満足する N_c ($0 < N_c \leq N$) 個のクリティカル作業 $a(1), \dots, a(N_c)$ で構成されるクリティカルチェーン $\mathbb{C} = \{a(1), \dots, a(N_c)\}$ ($\mathbb{C} \subseteq \mathbb{A}$) が存在することとする。

$$S_{a(l)}^0 + d_{a(l)} = S_{a(l+1)}^0 \quad (l = 1, \dots, N_c - 1) \quad (5)$$

$$\sum_{l=1}^{N_c} d_{a(l)} = T_0 \quad (6)$$

プロジェクトの当初スケジュール π_0 のクリティカルチェーン \mathbb{C} 上に時間バッファを配置することにより、不確実性に起因するプロジェクト遅延を「吸収」し、チェーンを保護する (クリティカルチェーンを構成する作業が常に同じとする) ことが CC/BM の本質である。時間バッファは経営学的視点からもその有効性が論じられている⁽⁵⁾。CC/BM の主な特徴は次のとおりである。

- ・ 各作業の作業時間について、達成確率を 50%として見積もる。
- ・ 立案されたプロジェクトスケジュールの最後尾にプロジェクト・バッファ (Project Buffer) を、クリティカルチェーンに合流する (チェーン上にない) 作業の最後尾に合流バッファ (Feeding Buffer) を配置する。

実務では、作業の達成確率 (作業時間分布に占める割合) を 80%から 90%とするのが一般的であるが、CC/BM では、プロジェクトの安全余裕時間としてのプロジェクト・バッファを確保するために、作業時間を切り詰める。この考えは ABP (Aggressive But Possible) とい

う。また、プロジェクト・バッファの目安として、クリティカルチェーンの長さの50%（米国では経験的に25%）とする⁽¹⁾。

図1にCC/BMによるプロジェクトスケジュールの一例を示す。この図では、7つの作業から構成されるプロジェクトにおいて、作業1, 3, 5, 7がプロジェクトのクリティカル作業でありクリティカルチェーンを形成する。作業7の完了時刻がプロジェクトのメイクスパンとなる。ここに、クリティカルでない作業（作業2, 4, 6）のうち、クリティカルチェーンに合流する作業2および6の直後に合流バッファを挿入し、かつ作業7の直後にプロジェクト・バッファを挿入している。

上記において、プロジェクト・バッファの消費量はプロジェクト全体の遅延量に相当し、また合流バッファによりクリティカルチェーンの保護（クリティカルでない作業をクリティカル作業にさせないこと）が可能となる。すなわち、プロジェクトマネージャはこれらの時間バッファの消費の監視に注力すればよく、これこそがバッファ管理と呼ばれる所以で

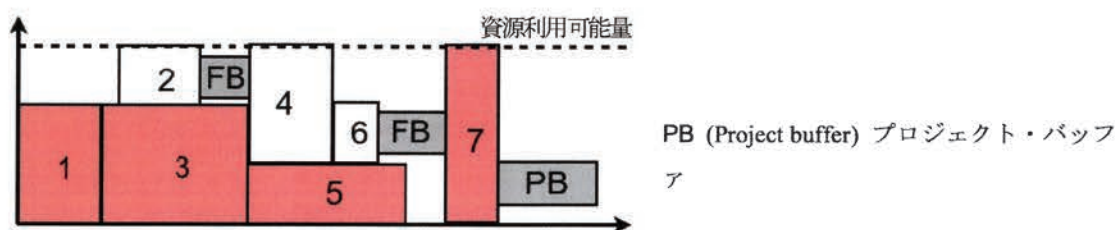


図1 CC/BMによるバッファを有するプロジェクトスケジュールの例

ある。

CC/BMはブレークスルーのプロジェクト管理技法として、その評価は非常に高い⁽⁵⁾。一方で、Goldratt⁽³⁾は著書や関連論文において、作業時間の見積りやバッファサイズの理論的根拠を伴う設計指針に触れておらず、様々な解釈があることに注意を要する。

3-2 確率モデル

プロジェクト・スケジューリングにおいて不確実性に対応する代表的なアプローチは、作業時間や利用資源量の変動を確率変数として表し、クリティカルパスの変動を分析評価することである。プロジェクト管理の古典的手法であるPERT/CPMでは、作業時間の変動がベータ分布に従うものと仮定し、いわゆる三点見積り法⁽⁴⁾を提供している。その上で、メイクスパンの変動が正規分布に従うとしてプロジェクトの達成度を評価する。なお、三点見積りを採用しない場合、メイクスパンの変動は、プロジェクトを構成する作業の時間分布の畳み込みにより表現する⁽⁶⁾。以上の確率モデルに関連して、確率変数をファジィ数に、確率分布をメンバーシップ関数に置き換えたファジィ概念に基づく技法も種々提案されている⁽⁷⁾。しかしながら、ファジィの理論および実証的研究そのものが縮小しており、本稿では割愛する。

4. クリティカルチェーン・スケジューリングの最適化モデル

筆者らはCC/BMの汎用モデルの導出を意図して、ゆとりを持つプロジェクトのモデルを構築した^{(8),(9),(10)}。このモデルに基づくスケジュール生成法を総称してクリティカルチェー

ン・スケジューリングと呼ぶ。ここでは、クリティカルチェーン・スケジューリングの重要な成果を紹介し、従来のCC/BMの枠組みに対する本成果の位置付けを議論する。

4-1 プロジェクト・バッファの最適化モデル

当初スケジュール π_0 に大きさ（サイズ） K 単位時間のプロジェクト・バッファを挿入することを考える。このとき、 K をどのように与えればよいであろうか？

バッファを有するスケジュールを緩衝スケジュールと呼ぶこととする。緩衝スケジュールのメイクスパンは、3-1節の定義によれば $T = T_0 + K$ となる。図2に示すように、プロジェクトが実際に T までに終わると、プロジェクトの実行過程で生じた遅延をバッファで吸収したことになる。しかしプロジェクトの完了時刻が T を超過する場合、多大な費用が発生すると考えることができる。実際のPMでは、（契約した）メイクスパンを遵守すること

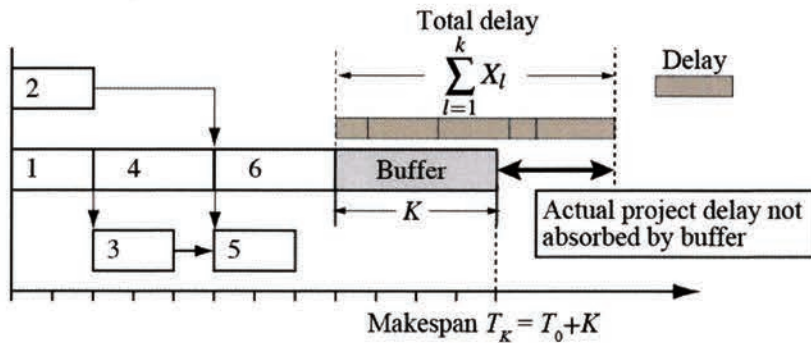


図2 時間バッファと遅延量の関係

が至上命題ともいわれる。

プロジェクトの実行中に k 回目に生じた遅延の量を確率変数 X_k で表すこととすると、累積の遅延量 $\sum_{l=1}^k X_l$ が（結果的に） K を上回るかどうかといったバッファの挿入量に対するトレードオフを見出すことができる。そこで、諏訪ら⁽⁸⁾は、プロジェクト進行中で生起する遅延の単位時間あたりの費用を c_1 、単位時間あたりのメイクスパンの増加に対する費用 c_2 に関して、期待総費用 $C(K)$ を導入した。すなわち、次のとおり表される：

$$C(K) = c_1 \sum_{k=1}^{\infty} \int_K^{\infty} (x - K) dF^{(k)}(x) p_k(T) + c_2 K, \quad (7)$$

$$C(K) \leq C(0). \quad (8)$$

ただし、 $F^{(k)}$ は F の k 重の畳み込みを、 $p_k(T)$ は遅延を伴う不確定的事象が T までにちょうど k 回発生する確率である。(7)式の第2項ではバッファの挿入量に対する費用は線形増加することを意味する。また、(8)式は「プロジェクトは必ず遅延する」という現実の状況を想定している。このとき、

$$1 - p_0(T) > \frac{c_2}{c_1} \quad (9)$$

が成立する, すなわち遅延を伴う事象が少なくとも一度は生起する確率が, 費用の相対的重要性 (c_2/c_1) よりも大きい場合, $C(K)$ は下に凸となり, 期待総費用を最小にする有限のバッファ K^* が唯一存在する.

不確定的事象の発生頻度とその対処に要する時間の確率分布によっては, (7)式を陽に得ることができるが, 極めて限定的である. 現実には, 作業時間の見積り過程で得られる作業時間の変動に関する情報に基づいてメイクスパンの変動分布を推定するか, メイクスパンの遅延量を感度分析的にシミュレーションすることで対応することが考えられる.

4-2 バッファの配分に対する最適化モデル

プロジェクト・バッファの量が確定すると, 次に問題となるのはバッファの配置である. 森田・諏訪のアプローチでは, 図3に示すように, バッファを適当に分割し, 各クリティカル作業の直後に配置する⁽⁹⁾. 図3左では6個の作業からなる当初スケジュール π_0 において

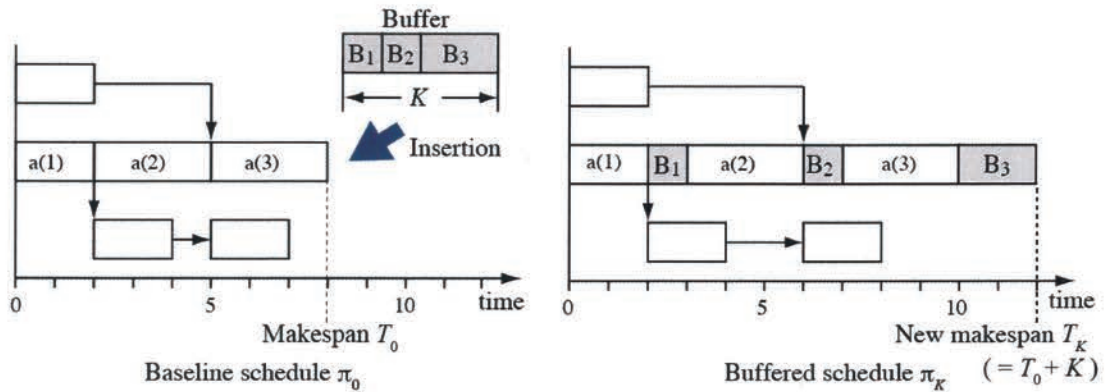


図3 時間バッファの配置と緩衝スケジュール

作業 1, 4, および 6 がそれぞれクリティカル作業であり, クリティカルチェーン $C = \{a(1), a(2), a(3)\}$ ($N_c = 3$) を構成する. ここに大きさ K のプロジェクト・バッファを用意し, 図3右のように, クリティカル作業の個数分に分割・配置し, 緩衝スケジュール π_k を生成する. この方法では, どのような分割・配置をしようともメイクスパンは $T_0 + K$ である. また, 用意したプロジェクト・バッファのすべてを最後のクリティカル作業 ($a(N_c)$) の直後に配置すると, プロジェクト・バッファに関して CC/BM と等価な戦略を取ることとなる.

森田・諏訪は, 最小摂動戦略 (Minimal Perturbation Strategy; MPS)⁽¹¹⁾を導入し, 作業開始時刻の「ずれ」を最小化する意味で最適なバッファの分割・配置方法を提案した. プロジェクト進捗における (予定と実際の) ずれは, 資源の在庫や雇用期間の延長などの追加費用を (時には即座に) 招くことから, ずれを可能な限りおさえること, すなわち「予見性」を考慮した最適化を講じることは有効であると考え.

サイズ K のプロジェクト・バッファを N_c 個のバッファ B_1, B_2, \dots, B_{N_c} に分割する. バッファ B_l のサイズを K_l とする ($K = \sum_{l=1}^{N_c} K_l$). ここで, バッファサイズ $\mathbb{K} = (K_1, K_2, \dots, K_{N_c})$ が確定すると, 各作業の開始時刻がすべて決まるので, バッファの分割・配

分に関わるコスト関数は \mathbb{K} の関数となる。作業 i の開始時刻を確率変数 Y_i で表すものとすると、バッファの分割に対する次の最適化問題を得ることができる。

$$\text{Minimize } f(\mathbb{K}) = E \left[\sum_{i=1}^{N+1} h(Y_i, S_i^K) \right] \quad (10)$$

$$\text{Subject to } K = \sum_{l=1}^{N_C} K_l, \quad (11)$$

$$S_{a(j)}^K = S_{a(j)}^0 + \sum_{l=1}^{j-1} K_l, \quad (j = 1, \dots, N_C) \quad (12)$$

$$S_i^K = \max_{v \in \mathbb{P}_i \cup \tilde{\mathbb{P}}_i} (S_v^K + d_v). \quad (13)$$

$$K_l \geq 0 \quad (j = 1, \dots, N_C)$$

ただし、 S_i^K は緩衝スケジュール π_k 上での作業 i の開始時刻を表す。また、 $\tilde{\mathbb{P}}_i (\neq \mathbb{P}_i)$ は当初スケジュール π_0 の生成過程において、作業 i と資源利用の競合関係にあったが、山崩しの結果、作業 i に先行することとなった作業の集合である。(10)式の関数 h は各作業の予測と実測の「ずれ」を表すコスト関数であり、関数 f はその期待総コストである。(11)式はバッファサイズの整合性を示す制約である。(12)および(13)式はクリティカル作業の開始時刻に関する制約を表す。

4-3 バッファ分割問題に対する厳密最適手法の構成

4-2 節に示した最適化問題は陽に解けないため、(10)式の代替指標として、作業 i の開始時刻 S_i^K がバッファ配置により変動する（作業 i が時間軸上で移動する）費用：

$$C(S_i^K) = \sum_{t=L_i}^{U_i} H(t, S_i^K) G_i(t) \quad (14)$$

$$U_i = \max_{j \in \mathbb{P}_i} (U_j + b_j - 1) \quad (15)$$

$$L_i = \max_{j \in \mathbb{P}_i} (L_j + a_j) \quad (16)$$

を導入する⁽⁹⁾。ただし、 a_j および b_j は、PERT/CPM における作業時間の楽観値と悲観値を表す。また、 $G_i(t)$ は作業 i の開始時刻が t ($L_i \leq t \leq U_i$) となる離散確率を表す。確率 $G_i(t)$ は離散確率であり、そのモデルと算出方法の詳細は、文献⁽¹⁰⁾を参照されたい。

ここでの最小摂動戦略とは、具体的には移動費用の総和 $\sum_i C(S_i^K)$ の最小化である。森田・諏訪はその厳密最適化のために分枝限定法によるバッファ分割法を提案した⁽⁹⁾。分枝限定法

は一般に、対象問題（元の問題）を部分問題に分割することにより、元の問題をルートとする探索木を逐次生成していく。探索木のノードは一つの部分問題に相当し、部分問題をすべて解いて得られる最適解の一つは元の問題の最適解となる。ここでルートの深さ（レベル）をゼロとすれば、レベル λ の探索木ノードにおける部分問題は、バッファ B_1, \dots, B_λ の各々のサイズ K_1, \dots, K_λ が定まっており、バッファ $B_{\lambda+1}, \dots, B_{N_C}$ のサイズを決定する問題となる。この部分問題は、バッファ $B_{\lambda+l}$ のサイズ $x_l (\geq 0)$ を決定変数として、次のとおり定式化できる。

$$\text{Minimize } \sum_{i \in \mathbb{A}} C(S_i^K) \quad (17)$$

$$\text{Subject to } S_{a(j)}^K = S_{a(j)}^0 + \sum_{l=1}^{j-1} K_l, \quad (j = 1, 2, \dots, \lambda + 1) \quad (18)$$

$$S_{a(j)}^K = S_{a(j)}^0 + \sum_{l=1}^{\lambda} K_l + \sum_{l=1}^{j-\lambda-1} x_l \quad (j = \lambda + 2, \dots, N_C) \quad (19)$$

$$K = \sum_{l=1}^{N_C-\lambda} x_l + \sum_{l=1}^{\lambda} K_l \quad (20)$$

$$S_i^K = \max_{v \in \mathbb{P}_i} (S_v^K + d_v). \quad (21)$$

$$x_l \geq 0 \quad (l = 1, 2, \dots, N_C - \lambda) \quad (22)$$

この部分問題は、(10)-(13)式の最適化問題に基づく。部分問題をすべて列挙すると、それは全数探索することと等価となるため、効率良く探索する（すべての部分問題の探索を回避する）には、部分問題を評価するための下界を導入せねばならない。上記の部分問題に対する下界 LB は、 $\mathbb{K}^\lambda = (K_1, K_2, \dots, K_\lambda)$ を用いて、

$$LB = \sum_{i \in \mathbb{F}_\lambda} C(S_i(\mathbb{K}^\lambda)) + \sum_{j \in \mathbb{A} \setminus \mathbb{F}_\lambda} \min_{S_j(\mathbb{K}^\lambda) \leq t \leq U_j} C(t) \quad (23)$$

$$\mathbb{F}_\lambda = \{i \mid i \notin \mathbb{Q}_{a(k)}; k = \lambda + 1, \dots, N_C\} \quad (24)$$

で与えることができる。(24)式の \mathbb{F}_λ は、探索木のレベル λ において開始時刻が定まる作業の集合を表す。

以上が諏訪・森田らによる分枝限定法の基本設計である。これらの部分問題と下界を、深さ優先探索（複数最適解の列挙よりも一つの最適解の導出を優先すること）による探索木生成の枠組みに実装し、分枝限定法を実現した。これにより、(14)式に基づく移動総費用を最小にする最適なバッファ分割を得ることができる。問題の構成によっては、60 作業から 120

作業のプロジェクトに対する最適なプロジェクト・スケジュールを生成することが可能である⁽⁹⁾。

5. 最小摂動戦略に基づくスケジューリングの優位性

2-1 節で紹介したプロジェクト・タイム・マネジメントにおいて、本論文で取り上げたプロジェクト・スケジューリングのモデルや技法は表 1 のとおりまとめることができる。PERT/CPM では(3)での資源制約をいったん無視した上で、三点見積りと呼ばれる方法で作業時間を指定する。スケジュール生成（資源制約を考慮した上での作業の山崩し）では簡易な優先規則が用いられる。RCPSP は資源量と作業時間が既知のもとでのスケジューリング技法が対象である。

また、CC/BM と最小摂動戦略に基づく提案手法（以下、MPS）は不確実性を考慮した作業時間の見積りとスケジュール生成をカバーしており、PERT/CPM と RCPSP に比して、属人性が少なく合理的な意思決定が可能となる。なお、MPS の拡張として、工数（資源と作業時間の積）を見積もるための最適化手法が提案されており⁽¹²⁾、この方法では三つのサブプロセスをすべて網羅している。

表 1 既存モデル・手法の適用対象範囲

サブプロセス	PERT/CPM	RCPSP	CC/BM	MPS (提案手法)
作業の資源見積り	-	-	-	✓*
作業時間の見積り	✓	-	✓	✓
スケジュールの生成	✓	✓	✓	✓

*は、MPS の拡張となる工数見積り方法⁽¹²⁾ を含める場合。

次に、CC/BM と MPS でのバッファに関する特徴を比較すると、表 2 のようにまとめられる。CC/BM は「こうすればよい」という大まかな設計指針は与えられているが、とくにスケジュールの生成について具体的なアルゴリズムは提供されていない。また、3-1 節でも触れたように、作業時間の見積りバッファサイズについて、学術と実務の両側面において、多様な解釈が加えられ、いくつかの考え方や方法論が検討されている^{(10),(13)}。とくに、バッファサイズを決定するための 50%ルール⁽¹⁰⁾の適用には注意が必要である。例えばメイクスパンが 10 ヶ月であるとすれば、5 ヶ月のバッファを見込むこととなり、これは現実的な時間的ゆとりではない。一方、MPS は、数理計画のアプローチを取ることで、バッファのサイズと配置箇所の決定方法に対する最適指針を与えることができる。これらに基づく分枝限定法などの厳密最適化は、解導出時間や構成の点でより効率的なヒューリスティクスを開発する際の基盤にもなる。

5. おわりに

クリティカルチェーン・スケジューリングの方法論は、プロジェクト遅延が生起するという実環境下では有効である。さらに最小摂動戦略を導入することにより、プロジェクト遅延

表2 CC/BM と MPS (提案手法) の比較

意思決定	CC/BM	MPS
バッファ	プロジェクト・バッファ:スケジュールの最後尾に配置する. 合流バッファ:クリティカルチェーンに合流する(クリティカルでない) 作業の最後尾に配置する.	プロジェクト・バッファのサイズを決定したのち, これを分割し, クリティカル作業の直後にのみ配置する.
バッファのサイズ	50%ルールにより決定する. (3-1 節)	最小摂動戦略に基づく最適化モデルにより決定する.
プロジェクトの期日	とくに規定されないが, 50%ルールにより, メイクスパンの 150% の長さとする事ができる.	プロジェクト・バッファの総量により定まる ($= T_0 + K$). (4-1 節)
作業の開始時刻	合流バッファの大きさにより資源競合が生じるため, 一意に定まらない場合がある.	バッファの最適分割方法により一意に定まる. (4-2 節, 4-3 節)

に対するある種の予見性を与えることが可能となる。Microsoft Project のアドオンや CC/BM による管理が可能な商用パッケージも開発されており, 実務レベルでもクリティカルチェーン・スケジューリングの認識が高まりつつあるといえる。最適化問題の商用パッケージもますます高速化しているため, 著者らの提案モデルに基づく精緻なプロジェクト・スケジュールをより短時間で生成する環境が容易に得られつつある。

プロジェクト計画の定量的評価では, ほとんどの場合, メイクスパンを含めて作業の完了時刻に関する非減少関数を扱うことから, プロジェクト・スケジュールに挿入すべきバッファのサイズと配置箇所が適切でないと, 生産性低下の意味でのリスクを伴うこととなる。すなわち, 現実のプロジェクトでは, 学生症候群(最早開始可能時刻で作業を開始しない; student syndrome)⁽⁴⁾やパーキンソンの法則(作業時間や予算に達するまで仕事量が膨張する)⁽¹⁴⁾といったプロジェクト従事者の心理に直結すると考えられる。したがって, インタフェース開発(緩衝スケジュールの見せ方)や, PM と従事者間が共有すべき情報場の設計が肝要である。また, プロジェクト進捗のリスク管理やプロジェクト・スケジュールの変更予算を加味したスケジューリング意思決定なども重要な検討課題である。

参考文献

- (1) Project Management Institute, “PMBOK GUIDE - Sixth Edition”, PMI (2017).
- (2) Jozefowska, J. and Weglarz, J., “Perspectives in Modern Project Scheduling”, Springer, NY, USA (2016).
- (3) Goldratt, E. M., “Critical Chain”, The North River Press, MA, USA (1997).
- (4) Leach, L. P., “Critical Chain Project Management”, ARTECH HOUSE, MA, USA (2005).
- (5) Demarco, T., “Slack: Getting Past Burnout, Busywork and the Myth of Total Efficiency”, Broadway Books, NY, USA (2001).

- (6) Lutwig, A., Mohring, R. H. and Stork, F., “A Computational Study on Bounding the Makespan Distribution in Stochastic Project Networks”, *Annals of Operations Research*, 102 (2001), pp.49-64.
- (7) Chen, S. P., “Analysis of Critical Paths in a Project Network with Fuzzy Activity Times”, *European Journal of Operations Research*, 183 (2007), pp.442-459.
- (8) 諏訪 晴彦, 森田 大輔, 三道 弘明, プロジェクト管理におけるダミーに基づくクリティカルチェーン・スケジューリング, システム制御情報学会, 22-12 (2009), pp.407-415.
- (9) Morita, D. and Suwa, H., “An Optimization Method for Critical Chain Scheduling toward Project Greenality”, *International Journal of Automation Technology*, 6-3 (2012), pp.331-337.
- (10) 森田 大輔, 諏訪 晴彦, プロジェクト管理におけるスケジュール・スタビリティ向上のための作業所要時間の見積り, システム制御情報学会, 25-6 (2012), pp.145-151.
- (11) El Sakkout, H. and Wallace, M., “Probe Backtrack Search for Minimal Perturbation in Dynamic Scheduling”, *Constraints*, 5-4 (2000), pp.359-388.
- (12) Herroelen, W. S. and Leus, R., “On the Merits and Pitfalls of Critical Chain Scheduling”, *Journal of Operations Management*, 19-5 (2001), pp.559-577.
- (13) 森田 大輔, 諏訪 晴彦, 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, 28-9 (2015), pp.384-391.
- (14) Newbold, R.C., “Project Management in the Fast Lane: Applying the Theory of Constraints”, CRC Press, FL, USA (1998).