



宮崎大学学術情報リポジトリ

University of Miyazaki Academic Repository

プロジェクトのリスクマネジメントのためのサポートシステムに関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 宮崎大学工学部 公開日: 2020-11-12 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 宮崎, 翔吾, 高塚, 佳代子, 油田, 健太郎, 山場, 久昭, 岡崎, 直宣, Miyazaki, Shogo メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10458/00010099

プロジェクトのリスクマネジメントのためのサポートシステムに関する研究

宮崎 翔吾^{a)}・高塚 佳代子^{b)}・油田 健太郎^{c)}・山場 久昭^{d)}・岡崎 直宣^{e)}

Research on a Support System for Project Risk Management

Shogo MIYAZAKI, Kayoko TAKATUKA, Hisaaki YAMABA,
Kentaro ABURADA, Naonobu OKAZAKI

Abstract

In recent years, with the large-scale complexity of projects and changes in the environment surrounding projects, the problem of "delay risk", that is, the problem that any activity can cause unexpected delays and lead to delivery deadlines, has become more serious. Therefore, in recent years, project managers have been required to manage delay risks at various project sites. In other words, the conventional management of three factors of cost, resource, and time is not enough, and it is necessary to manage the schedule by considering the trade-off balance of these four factors and the delay risk. However, since there is no way to quantify the delay risk, only the delay risk management that can give the schedule margin with experience and intuition was performed. As a result, problems often occurred, such as easily exceeding deadlines and costs or causing wasteful schedules. In this research, we aim to develop a schedule management method considering delay risk. In previous research, a method was developed to evaluate the magnitude of delay risk based on the size of the solution space of the schedule / float. In addition, we devised two types of calculation methods (method 1 and method 2) for finding the delay risk with the proposed method. However, method 1 had a problem of computational complexity, and method 2 had a problem of accuracy of the calculation results. In this paper, we propose a new calculation method that requires less calculation than Method 1 and has higher calculation accuracy than Method 2. In addition, we evaluate the complexity of the proposed method and the accuracy of the calculation results through verification experiments using application examples.

Keywords: project management, critical path, delay risk, EVM, schedule network

1. はじめに

近年では、プロジェクトの大規模複雑化やプロジェクトを取り巻く環境の変化に伴い、「遅延リスク」の問題、つまり、任意のアクティビティが予期せぬ遅延をきたし納期超過に至る可能性の問題が深刻化している。そのため、近年の様々なプロジェクトの現場では、遅延リスクを管理することが、プロジェクト管理者（“プロジェクトマネージャ”とも言う）に要求されている。つまり、従来のような、コスト、リソース、時間の3要素での管理では不十分であり、それら3要素に遅延リスクを加えた4要素のトレードオフ・バランスを考え、スケジュール管理をすることが求められている。しかし、遅延リスクを数値化する手立てがないため、スケジュールの余裕を経験と直感で持たせる程度の遅延リスク管理しかできていなかった。その結果、簡単に納期超過やコストオーバーに陥ったり、或いは無駄の多いスケジュールに結果的になってしまっていたような問題が頻繁に発生していた。そこで、本研究では遅延リスクを考慮したスケジュール管理手法の開発を目指

している。先行研究では遅延リスクの大きさをスケジュール・フロートの解空間の大きさに基づき評価する手法を開発した。また、提案手法で遅延リスクを求めるための計算方法を2種類（方法1、方法2）考案した。しかし方法1には計算量の問題があり、方法2には、高次元での計算結果の精度が明らかでないという問題があった。本稿では方法1より計算量が少なく方法2より高次元での計算精度の保証がし易い新たな計算方法を提案する。さらに、適用例を使った検証実験を通し、提案手法の計算量と計算結果の精度を評価する。

1.1 背景と問題点

1970年以前のプロジェクト管理では、工程を図形式で描き、原価は表計算ソフトで表にするといったように、それぞれ個別に管理されていた。このため、図1に示すような工程（時間）、資源、原価（コスト）のトレードオフのバランス調整を人が経験と直感に基づいて管理するしかなかった¹⁾²⁾。したがって、プロジェクトの実際の状況を把握できず、工程は順調に進んでいるがコストオーバーとなってしまうたり、逆にコストは予定範囲だが出来高が計画レベルに達していないといった問題が発生していた。1970年頃より、「アード・バリュ法」(EVM)³⁾⁴⁾と呼ばれるコスト効率と工程の進捗率を一度に把握するためのプロジェクト管理の技法が考案された。この手法により、工程、資源、原価のバランスが取れた計画と進捗管理が可能となった⁵⁾。しかし、このプロジェクト管理では、少しの遅延も許容できず融通の利かないスケ

^{a)}工学専攻機械・情報系コース大学院生

^{b)}教育研究支援技術センター技術専門職員

^{c)}情報システム工学科准教授

^{d)}情報システム工学科助教

^{e)}情報システム工学科教授

ジューリングしかできなかった。そのため、容易に納期超過やコストオーバーに陥ってしまうといった問題や、新規プロジェクトのスケジュールに直感で余裕を持たせたが、のちに無駄の多いスケジュールだったことが発覚するといった問題も発生していた。特に近年では、プロジェクトを取り巻く環境も変化してきており、大規模化したプロジェクトや複雑化したプロジェクトの「遅延リスク」の問題が深刻化している。「遅延リスク」とは、プロジェクトの完了が遅延し、納期超過を引き起こすリスクのことである。そのため、スケジュールに直感で余裕を持たせることによる問題は更に大きくなっている。この問題を回避するためには、図2に示すような、EVMでの3要素「工程(時間)、資源、原価(コスト)」に、「遅延リスク」を加えた4要素のトレードオフのバランスを取ることが求められる。以上を踏まえ、本研究では、遅延リスクを考慮したスケジュールの仕組みが考案されている⁶⁾⁷⁾。これらの手法⁶⁾⁷⁾は、上記実情の下になされたものであり、工程(時間)、資源、原価(コスト)に加え、遅延リスクも考慮して、スケジュール・ネットワークを合理的に管理することができるプロジェクトマネジメントシステム及びプロジェクト管理方法を提供することを目的としている。上記目的を達成するためのプロジェクトマネジメントシステムは、複数のアクティビティで構成されるプロジェクトを管理するプロジェクトマネジメントシステムであり、大きく分けて、次の2つの部分から構成される。

1. スケジュール・ネットワーク生成部：プロジェクトにおけるアクティビティ間の論理的順序関係と、各アクティビティそれぞれの所要時間とに基づいて、時間、原価及び資源の制約条件を満たすスケジュール・ネットワークを生成する部分
2. 遅延リスク評価部：各アクティビティそれぞれに許容される余裕時間を示す余裕パラメータを要素とするベクトル空間において、アクティビティ間の独立従属関係に基づいて、スケジュール・ネットワークを簡略化すると、スケジュール・ネットワークの全体期間(納期)に対する「余裕」(“遅延リスク耐性”と後述する)を表すN次元正凸多面体の領域が得られる(Nはアクティビティ間の独立従属関係で決まる次元の大きさ)。その領域の大きさ又はその大きさの(アクティビティの)遅延に対する感度を指標値としてスケジュール・ネットワークを評価する部分

上記1の「スケジュール・ネットワーク生成部」は、アーン・バリュー法等の従来の手法を用いて実現できる部分であり、上記2の「遅延リスク評価部」は本研究室での開発部分である。遅延リスクが「なるべく少なく」なれば、そのスケジュール・ネットワークの遅延リスクが小さく、評価が高いということになる。しかしながら、遅延リスクを直接的に定量化するのは困難である。そこで、本研究室では、「遅延リスク耐性」という概念を導入した⁶⁾。遅延リスク耐性とは、任意のアクティビティが予期せぬ遅延をきたした際に、納期超過に至らずに済む可能性の大きさのことである。遅延リスク耐性は、遅延リスクと負の相関があり、比較的定量化が容易である。具体的には、上述のN次元正凸多面体の大きさを直

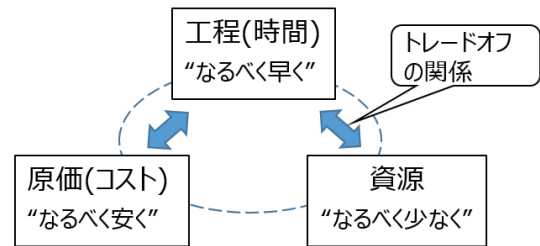


図1. 工程(時間)、資源、原価(コスト)のトレードオフのバランス

接求めることは原理的に困難であることから、先の研究では、遅延リスク耐性を定量化する方法として、次の2つの計算方法を考案した。一つは、N次元正凸多面体の格子点数を遅れ方のパターンの数として算出する方法である。従って、この第1の方法の計算精度は格子幅を細かくすればある程度信頼できる。しかし、アクティビティの数が増えれば、計算量が膨大となり、簡単に計算不能に陥ってしまう⁶⁾。また、もう一つは、N次元正凸多面体に内接する最大の単体の体積を、遅れ方のパターンの数として算出する方法である。この第2の方法の計算時間は高々次元のオーダーであるため計算量の問題はない。しかし、評価すべきN次元正凸多面体の形状の全てをそれに内接する最大の単体に無理矢理近似させて評価する方法であるため、次元が上がるにつれ、計算結果の精度が大きく低下する可能性がある。以上を踏まえ、本研究では、遅延リスク耐性を表すN次元正凸多面体の大きさを定量化するための新たな計算方法を提案する。この第3の方法では、N次元正凸多面体から体積計算の一般化が可能な構造を全て抽出し、抽出された構造の大きさ又はその大きさの遅延に対する感度を指標値としてスケジュール・ネットワーク全体の余裕を評価する。この第3の方法は、極めて小さな計算量で評価できる方法である可能性が、本研究の評価実験より示された。例えば、遅延リスク耐性を表すN次元正凸多面体の次元がN=15の一例での計算時間は、第1の方法で約90時間、第2の方法で約2~3秒、新たな第3の方法で約16秒であった。また、格子の刻み幅を十分小さくした場合の第1の方法と同程度の計算精度を持つことが、本例では確認された。即ち、スケジュール・ネットワーク全体の余裕の遅延に対する感度を求める感度解析をしたところ、新たな第3の方法による解析結果は、格子幅の十分小さい(格子幅0.5)第1の方法による結果と98%一致した。なお、15次元の本例の場合、第2の方法との一致率も高く95%であった。しかし、より高い次元(23次元)の適用例を用いた評価実験での感度解析の結果は、第1の方法より第2の方法との一致率の方が顕著に高かった。その理由は、第1の方法の計算量の問題により、格子幅をかなり荒く(格子幅2)しないと計算できなかったこと、及び、第2の方法での計算精度の問題が23次元程度では現れ難かったことが考えられる。詳細は第7章で示す。

2. 研究目的

本研究の目的は、遅延リスクを考慮したプロジェクト・スケジュールの管理の仕組みを開発することである。具体的には、従来の「アーン・バリュー法」(EVM)での工程(時間)、資源、原価(コスト)に加え、遅延リスクも考慮し、プ

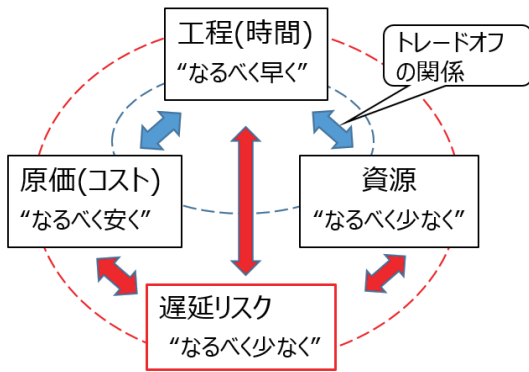


図2. 工程(時間)、資源、原価(コスト)に遅延リスクを加えた4要素のトレードオフのバランス

プロジェクトのスケジュール・ネットワークを合理的に管理することができるプロジェクトマネジメントシステム及びプロジェクト管理方法を提供することである。目的達成のため、本研究室の先行研究では、スケジュール・ネットワークの遅延リスクと負の相関関係にある遅延リスク耐性の定量化のため、先行研究では、第1の方法(格子点数による評価)及び、第2の方法(N次元正凸多面体に内接する最大の単体の体積に基づく評価)が開発されたが、第1の方法には計算量の問題が、第2の方法には高次元での精度を保証し難いという問題があった。そのため、第1の方法より少ない計算量で第2の方法より高次元での精度が保証しやすい第3の方法が考案された。上述したように、第3の方法は、N次元正凸多面体から体積計算の一般化が可能な構造を全て抽出し、抽出された構造の大きさ又はその大きさの遅延に対する感度を指標値としてスケジュール・ネットワーク全体の余裕を評価するという方法である。しかし、第3の方法は、グラフ理論⁸⁾をベースとした仮説であり、その正しさは図的表現が可能な3次元までの簡単な例で確かめられているに過ぎなかった。しかし、第3の方法は、グラフ理論をベースとした仮説であり、その正しさは図的表現が可能な3次元までの簡単な例で確かめられているに過ぎなかった。

2.1 研究目的

以上を踏まえ、本修論では、新たに考案された第3の方法が、遅延リスクの評価を、少ない計算量で精度よく実施できる方法であることを実験的に明らかにすることを目的とした。具体的には、スケジュール・ネットワークの遅延リスクと負の相関関係にある遅延リスク耐性のN次元正凸多面体の大きさの評価が、次元NやActivity数が大きいケースでも、現実的な計算量で精度よく評価できる方法であることを明らかにすることを目的とした。

2.2 研究課題

研究課題は以下の通りである。

1. 新たな第3の手法で遅延リスク評価をするための感度解析の手順(即ち、アクティビティの遅延の感度を指標化する手順)の開発及び自動化
2. 適用例を用いた評価実験に基づく、第3の方法の性能評価実験

1) 計算時間と計算精度の評価

2) 計算量抑制の可能性を見極めるための評価

2-2) は、今後より大規模なプロジェクトのケースを扱う場合を想定した、精度と計算量のトレードオフを見るための評価実験である。なお、今回使用する適用例は以下の通りである。

- 中規模ガス処理プラント建設プロジェクト (JAPEX プロジェクト)
 - 「15次元、Activity数15」のケース
 - 「24次元、Activity数26」のケース
- 電力設備の解体修理点検プロジェクト (13次元、Activity数150程度)

3. プロジェクトマネジメントについて

3.1 プロジェクトとは、プロジェクトマネジメントとは

3.1.1 プロジェクトとは

プロジェクト⁵⁾とは、実行する人や組織が特別な目的や課題を達成するための取り組みのことであり、プロジェクトを定義する基本要素として以下の3つが重要とされている。

1. 新規性があるといった達成が容易ではない特別な目的がある
2. プロジェクトを達成するための期間が有限である
3. プロジェクトに用いる資源が有限である

さらに、生産的なシステムとしてのプロジェクトの特徴は以下ようになる。

1. 同一のものを生み出し続けるような単純な生産ではない
2. サービスやシステムなど形のないものを生産する場合もある
3. 目的を達成するための計画を複数以上立てることができる
4. 計画の進捗状況によって計画を修正する
5. 一時的に組織されるチームで計画を進行する

3.1.2 プロジェクトマネジメントとは

プロジェクトでは、計画の進捗に伴って起こる様々な条件の変化や発生するリスクを考慮し、目的達成の確実性を評価しつつ合理的な手法でプロジェクトのスケジュールを立てる必要がある⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾。しかし、事前に明らかになっていない問題が発生することが少なくないため、科学的な手法でスケジュールを立てても、推測や仮定に基づく部分を排除することはできない。そこで、プロジェクトマネジメントでは計画立案段階でのスケジュールの設定だけでなく、計画実施段階でも頻繁に進捗状況を確認し、計画に基づいた進捗のうえ軌道修正を行わなければならない。また、従来の管理はコントロールと呼ばれ、現場を統制することが重視されていた。しかし、近年のプロジェクトの複雑化・大規模化によって、新たな管理方法であるマネジメントの考え方が普及していった。マネジメントは、従来重視していた現場の統制だけでなく、計

画と評価を含めたプロセス全体を重視した管理の形態をとっている。つまり、計画と実施した結果を比較評価し、目的を達成するためにより効率の良い方法へと計画を修正する形態である。本稿の以下では、“管理”は“マネジメント”と同義とする。

3.2 プロジェクトマネジメントのスケジュール管理について

プロジェクトマネジメントでのスケジュール管理においては、主に工程、コスト、品質を対象に管理・評価すべきである。しかし、現在の管理手法では品質の評価は組み込まれていない。「(実施計画に対して) どれだけ計画通りにできているか」の工程に関する評価と、「(計画予算に対して) どれだけ予算内で実施されているか」のコストに関する評価で管理・評価を行っていた。具体的には、工程評価とコスト評価を別々のシステムで計算し、これらの結果から管理者が直感や経験則に基づいて総合的に評価・判断していた。以下では、プロジェクトマネジメントのスケジュール管理について現状が順調かどうかを評価するための二つの考え方を紹介する。

3.2.1 進捗度評価

進捗度評価とは、プロジェクトの進み具合のみを評価するものであり、従来の工程管理の一環として行われてきた。工程の進捗が計画と比べてどこまで完了したのかを調査し、それがプロジェクト全体においてどの程度の割合で進んでいるかを把握することが、進捗度評価という評価方法である。例えば、住宅建築といったモノを作るプロジェクトでは、作成されたモノの大きさや量で評価することができる。また、形や量で表しにくいシステム開発などのプロジェクトでは、完了した活動の価値を金額で換算することにより進捗度を評価する。このような進捗度評価に用いる指標を出来高 (earned value) と呼ぶ。

3.2.2 達成度評価

出来高を指標として用いた進捗度評価では、コスト変動が激しいプロジェクトでは、現況を見誤ってしまう場合もある。実際、プロジェクトマネージャーはプロジェクトの進捗具合を工程の進捗と原価や品質などの総合評価によって判断している。そこで、1970年頃から米国で達成度評価と呼ばれる評価方法が開発されてきた。達成度評価は、工程だけではなく原価要素も加味したプロジェクトの現況評価をしようとする考え方であり、“どれだけできたか”という量的な判断だけではなく、それにかかったコストを加味して評価する。このため、工程におけるコストのバランスなどを総合的に判断することができるようになってきている。この達成度を求める手法としてアードバリュー法 (EVM) がある。

3.3 プロジェクトマネジメントの技術的背景・問題点

1970年以前のプロジェクト管理では、工程を図形式で描き、原価は表計算ソフトで表にするといったように、それぞれ個別に管理されていた。このため、図1に示すような工程(時間)、資源、原価(コスト)のトレードオフのバランス調整を人が経験と直感に基づいて管理するしかなかった。し

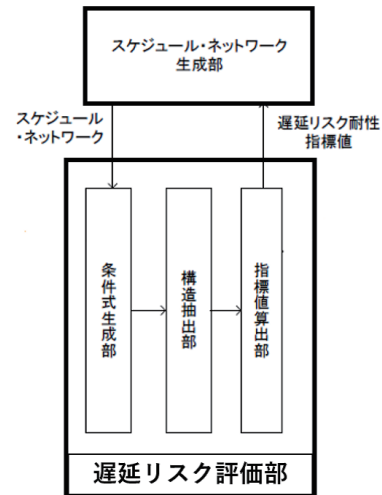


図3. システムの全体像

たがって、プロジェクトの実際の状況を把握できず、工程は順調に進んでいるがコストオーバーとなってしまうたり、逆にコストは予定範囲だが出来高が計画レベルに達していないといった問題が発生していた。

3.3.1 アード・バリュー法 (EVM)

1970年頃より、「アード・バリュー法」(EVM)³⁾と呼ばれるコスト効率と工程の進捗率を一度に把握するためのプロジェクト管理の技法が考案された。この手法により、工程、資源、原価のバランスが取れた計画と進捗管理が可能となった。(参照1)しかし、このプロジェクト管理では、少しの遅延も許容できず融通の利かないスケジュールリングしかできなかった。そのため、容易に納期超過やコストオーバーに陥ってしまうといった問題や、新規プロジェクトのスケジュールに直感で余裕を持たせたが、のちに無駄の多いスケジュールだったことが発覚するといった問題も発生していた。

3.3.2 技術的問題点

プロジェクトが失敗してしまうための理由としては、組織や個人に関わる人的な問題点と計画や進捗の管理に関わる技術的な問題点がある。プロジェクトマネジメントにおいては計画や進捗の管理に関わる技術的な問題点が大きく関わってくることもあり、以下の三つの技術的問題点があげられる。

1. 計画を立てる際の科学的な方法がない
2. 目的達成のための品質や担当を組織間で明確にできない
3. 科学的に進捗状況を管理できない

このことから、科学的な根拠をもとに計画や評価、管理を行い、不確定な物事を明確にすることで、技術的問題点を解決するプロジェクト管理システムを開発する必要がある。

4. システムの構成

本研究の目的を達成するためのプロジェクト管理システムは、複数のアクティビティで構成されるプロジェクトを管理するシステムであり、図3に示すように以下のような構成となっている。

- スケジュール・ネットワーク生成部：スケジュール・ネットワークを生成する

- 遅延リスク評価部：スケジュール・ネットワークをもとに遅延リスク耐性の指標値を算出する

また、遅延リスク評価部の、本稿での実現方法の構成は以下のとおりである。

1. 条件式生成部：スケジュール・ネットワークのパスに対応する制約条件式を生成する
2. 構造抽出部：体積計算の一般化が可能な構造を抽出する
3. 指標値算出部：構造の体積計算を行って得られる構造の大きさを指標値として算出する

スケジュール・ネットワーク生成部とは、プロジェクトにおけるアクティビティ間の論理的順序関係と、各アクティビティそれぞれの所要時間とに基づいて、時間、原価及び資源の制約条件を満たすスケジュール・ネットワーク (図 4(1)) を生成する部分であり、その手順は既存手法として確立されている。また、遅延リスク評価部とは、スケジュール・ネットワークの「遅延リスク」即ち、任意のアクティビティ (作業) が予期せぬ遅延をきたし、納期超過に至る可能性の大きさを算出する部分である。しかし、遅延リスクを直接的に定量化するのは困難である。そのため、遅延リスクの定量化については、議論すらされてこなかった。そこで本研究室では、遅延リスクの代わりに、これと負の相関関係のあるスケジュール・ネットワーク全体の「余裕の大きさ」を定量化する考え方を編み出し、これを「遅延リスク耐性」と呼ぶこととした。

具体的には、まず、スケジュール・ネットワークの各作業パスの長さの制約 (納期制約) を、標準的な作業時間と余裕時間を取るパラメータ (余裕パラメータ) で表す。すると、その制約条件式全体 (図 4(2)) はベクトル空間上のN次元正凸多面体領域を成し、その大きさから「遅延リスク耐性」の大きさを定量化するという考え方である。しかし、このN次元正凸多面体領域の大きさの体積計算は一般化できない。そこで、その領域を指標化するための2つの方法が考案された (図 4(3))。第1の方法 (図 4(3)-①) は、領域に含まれる格子点数で指標化する方法で、第2の方法 (図 4(3)-②) は、領域に内接する最大の単体の体積で指標化する方法である。しかし、第1の方法には計算量の問題があり、第2の方法には指標化の誤差による精度の問題があった。そこで、本稿では、第1、第2とは別な第3の方法を取る。第3の方法とは、条件式生成部で得られるN次元正凸多面体領域 (遅延リスク耐性) から、余裕パラメータを積分変数、被積分変数として用いる積分計算、すなわち体積計算の一般化が可能な構造を抽出し (図 5(1))、抽出された構造の大きさを指標化するという考え方である。ここで、体積計算の一般化が可能な構造の抽出手順は次のように与えられる。まず、制約条件式の各パラメータの有る/無しを表す1/0行列を生成する (図 5-③-1))。そして、この1/0行列を使って、体積計算可能な構造を抽出する。これは、「どの2列をとってきても、片方の列の1の立つ行がもう一方の列の1の立つ行に含まれているか、または、互いに素」となるような列セットとして、すべて抽出される (図 5-③-2))。ここで、N次元凸多面体領域から抽出される可能性のある構造とは、その領域自身或いは、その領域の2次元以上N-1次元以下の切断面となる。指標値算出部では、抽出された行列の

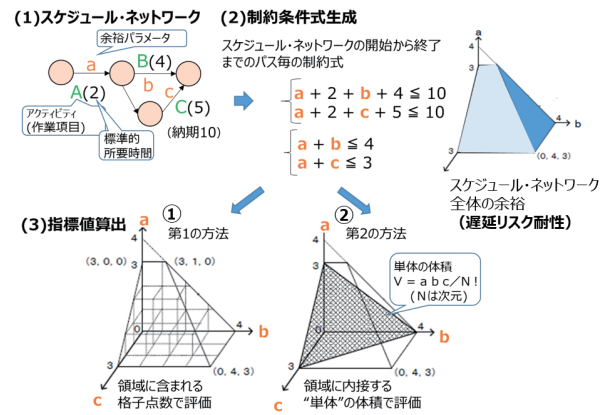


図 4. 遅延リスク評価部の実現方法 (先行研究)

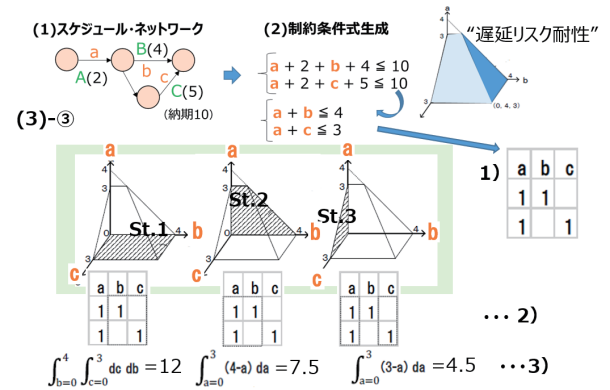


図 5. 遅延リスク評価部の実現方法 (本稿での方法)

うち、1となる行が最多となる第1の列に対応する余裕パラメータを積分変数とし、1となる要素が第1の列で1となる要素にすべて含まれる第2の列の余裕パラメータを被積分変数とし、積分変数の取り得る上限を積分変数が取り得る最小値として積分を行い、1となる行が全く一致しない列の余裕パラメータ同士では重積分を行って、抽出された構造の大きさを求める (図 5-③-3))。

5. 先行研究

本研究室の先行研究では、まずプロジェクト・スケジュールの全体余裕を統合的かつ合理的に管理するための手法として、スケジュール・フロートのベクトル空間表現法が考案され、本手法に基づくスケジュール管理のためのモデルが提案された。そして、既存の管理指標 (クリティカルパス、フロート残量 (安全余裕残量)、DRAG 等) を本モデルベースで簡便に計算できる方法が明らかにされた。また、この方法を使って、プロジェクト実行中時々刻々と変化していく重点管理項目を計算し可視化するシステムが開発された¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾。さらに、個々の作業項目の遅延がプロジェクト・スケジュールの全体余裕へ及ぼす影響の度合いを「遅延リスク耐性」と呼び、遅延リスク耐性の大きさを遅延リスク耐性を表すN次元凸多面体の大きさに基づき評価する2つの方法が考案された⁶⁾⁷⁾。方法1は、遅延リスク耐性を表すN次元凸多面体に含まれる格子点数による評価であり⁶⁾、方法2は、N次元単体の超体積の大小関係による評価である⁷⁾。

5.1 遅延リスクの定量化方法

良いプロジェクト・スケジュールを立案するためには、ネットワーク・スケジュールの評価と改善ができなくてはならないが、従来の管理手法では、評価の尺度として、「全体工期の長さ」、つまり、クリティカルパスの長さという一指標しかなかった。しかし、最近のプロジェクトでは、作業遅延が不規則に発生し、クリティカルパス¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾の移り変わりが多いため、従来どおりの全体工期の長さのみを指標とする手法では不十分である。不確定変動の大きいプロジェクトの場合、ある時点において、プロジェクト全体所要時間が契約納期を超過することにはならない非クリティカルパス上の Activity (Non-critical な Activity) の余裕があっても、フロート日数を消費してしまうと、それがクリティカルパス上の Activity (critical な Activity) に変わった途端にプロジェクトの早期完了の可能性を下げてしまうためである。そこで、不確定性の大きいプロジェクト・スケジュール管理上重要な一尺度となり得る「遅延リスク耐性」の定量化の方法と、その考え方の元となったスケジュール・フロートのベクトル空間表現法について説明する。

5.1.1 フロートのベクトル空間表現

スケジュール・フロートのベクトル空間表現法及び、この表現方法に基づくスケジュール管理のためのモデルについて示す。本手法は、グラフ理論ベースの手法である従来法の PERT²⁰⁾ に比べ、代数計算の簡便さゆえの高い分析力を潜在的に持つ。更に、本モデルはスケジュール・ネットワークの構造の直感的分かりやすさも PERT と同程度に兼ね備えている¹⁵⁾。

プロジェクトが Activity network で表されると、個々の Activity の時間的余裕をパラメータ表示し(“余裕パラメータ”と呼ぶ)、納期制約問題をパラメータベクトルの存在可能領域(“遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体”と呼ぶ)を求める問題に帰着させる。遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体は、個々の Activity の所要時間と余裕、Activity 間の先行関係、及び納期制約に基づき機械的な手順で求められ、余裕パラメータから成る係数 1 の不等式制約の集まりとして表される。各不等式制約はクリティカルパスに成り得る経路の経路長制約に対応付けられ、各式のパラメータの並び順は各経路の作業順序を表す。また、モデルの本質とは関係ないが、数式モデルにありがちな構造的理解のし難さを回避するための取り決めとして、各式のパラメータの並び順はスケジュール・ネットワーク上の作業項目の生起順序と定義した。また、作業項目とそれに付随する余裕パラメータとは、同じアルファベットの大文字と小文字で表記させることとした。このため、実数ベクトルで処理できる利点である高い分析力と計算力はもちろんのこと、ネットワークの構造的理解も従来 PERT と同程度には可能なモデルとなっている。

5.1.2 遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体の生成

遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体は、所与のスケジュール・ネットワークから、各作業項目の生起順序と作業時間を抽出し、各作業項目の時間的余裕を表す余裕パラメータを導入し、生起順序と生起時刻を同時に扱える max-plus 代数²¹⁾

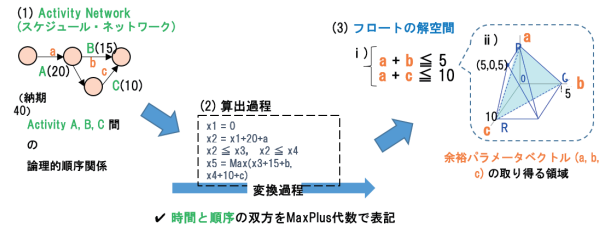


図 6. 遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体生成の流れ

を使用し、各作業項目の終了までにかかる時間を順に求めていく。具体的には以下のように求められる。

$$\begin{aligned} \text{作業 } p \text{ 終了までに掛かる時間} &= \text{Max}\{p_j \text{ の終了時刻} \mid p_j \\ &\text{は } p \text{ の先行作業全て} \} \\ &+ p \text{ の所要時間} + p \text{ の余裕パラメータ} \end{aligned}$$

なお、最終作業項目の終了までにかかる時間は、即ちプロジェクト全体所要時間を意味する。したがって、上記方法で得られる“最終作業終了までにかかる時間”に対し、納期制約を与えて得られる制約条件式「“最終作業終了までにかかる時間” ≤ 契約納期」が遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体の構成要素となる。ただし、最終作業項目の終了までにかかる時間は、初期作業項目から最終項目へ至る経路の数だけ得られる。従って、所望のモデルは、上述の制約条件式全体として得られる。

図 6-(1) のように、Activity A, B, C があり、所要時間がそれぞれ 20 日, 15 日, 10 日とする。A と B、A と C は直列に繋がりが、B と C は並行である。() 内は Activity の標準的所要時間を表す。x1 と x2 で Activity A の開始時刻と終了時刻、x3 と x5 で B、x4 と x5 で C の開始時刻と終了時刻を各々表し、小文字アルファベットで同大文字の Activity の余裕パラメータを表すと、所定の計算過程を経て(図 6-(2))、本例の遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体が(図 6-(3)) のように得られる。

あるシステム製品をおさめる仕事を表す簡単な例を考える(図 7 参照)。図 7 の Activity Network の () 内は各 Activity の標準的所要時間を表し、アルファベット大文字は作業項目名を表す ID、同小文字は当該作業項目の余裕パラメータを表す。つまり、例えば、「基本設計」を指す ID は A であり、標準的所要時間は 20、余裕パラメータは a である。契約納期を 80 とすると、本例の遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体は以下の連立不等式で表される。

$$\begin{cases} a + b + d + f \leq 5 \\ a + c + e + f \leq 15 \end{cases} \quad (1)$$

具体的には、まず、スケジュール・ネットワーク (Activity Network) から、各作業項目の生起順序と作業時間を抽出した工程表を作成し、各作業項目の時間的余裕を表す余裕パラメータを導入する。次に、作業項目の生起順序と生起時刻を同時に扱える max-plus 代数を使用し、各作業項目の終了までにかかる時間を順に求めていく。例えば、F の終了時刻は以下のように求められる。

あるシステム製品をおさめる仕事

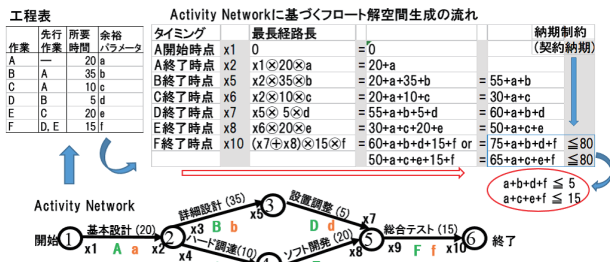


図 7. 遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体生成例

F 終了までに掛かる時間 = $\text{Max}\{D \text{の終了時刻}, E \text{の終了時刻}\}$

+ F の所要時間 + f (F の余裕パラメータ)

ただし、余裕パラメータ f の取る値は、F 実施期間の前後の余裕の和である。具体的には、ここでは、実施前の余裕とは既に作業可能だが何らかの理由で開始時間を先延ばしにしている処理待ち時間とし、実施後の余裕とは当該処理の遅延時間としてしている。なお、最終作業項目 F の終了までに掛かる時間は、即ちプロジェクト全体所要時間を意味する。従って、プロジェクト全体所要時間は $75+a+b+d+f$ 、 $65+a+c+e+f$ と表せ、所望のモデルは、納期制約 80 を与えた $\{75+a+b+d+f \leq 80, 65+a+c+e+f \leq 80\}$ となり、結果として上記の式 (1) が得られる。

まず、フロート (ここではトータルフロート) は、プロジェクト全体所要時間が契約納期を超過しない範囲でとれる作業項目の余裕日数の最大値であるが、これは遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体を表す不等式制約の集まりに対し、着目パラメータ以外の余裕パラメータの各々に、それが取り得る最小値を代入することで求められる。具体的には、実行済の作業項目の余裕パラメータには実データ (処理待ち時間+遅延時間) を与え、未実行項目の余裕パラメータには 0 を与えれば良い¹³⁾。

また DRAG²²⁾²³⁾²⁴⁾ は、クリティカルな作業項目がプロジェクト全体の工期を短縮できる日数の最大値であるが、これはクリティカルな作業項目と並行する経路の有無やその並行経路のフロート値を基に算出されるのだが、これら DRAG 算出に必要なデータ取得のための計算プロセスは PERT では煩雑になり易い。しかし、提案手法の遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体を使うと簡潔かつシステムティックに算出できる¹⁴⁾。

5.1.3 重点管理項目の可視化手法

まず、スケジュール管理上の利便性を考慮したフロートの扱いについて述べる。

時々刻々と変化していく各作業項目のフロートに基づき、クリティカルパスの所在とスケジュール全体の安全余裕残量の変遷を可視化する手法について示す。安全余裕残量とは、プロジェクト・スケジュールの全体余裕を表し、クリティカル

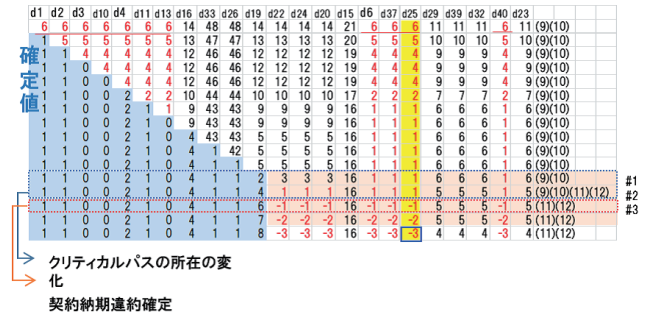


図 8. クリティカルパスと安全余裕残量の移り変わりの可視化のイメージ

パス上の作業項目のフロート値がそれに相当する。なお、通常のフロート計算では、クリティカルパス上の作業項目のフロートが 0 となるように、他の作業項目のフロートはそれを基準に数値化される。しかし、本手法では、スケジュール管理上の利便性より、クリティカルパス上の各作業項目のフロートが、契約納期に対する余裕となるようにしている。こうすることにより、あとどれだけ (何日) 遅れたら契約納期違約に至るかがダイレクトにわかるためである。

所与のスケジュールが示す作業項目間の順序制約に従って進められるプロジェクトの実行中、不規則に発生する作業遅延により、各作業項目の余裕が不規則に変化していく。従来、このような変化は、個々のフロートの変化としてばらばらに捉えられていたが、作業項目同士の有機的繋がり (余裕パラメータベクトル) の変化として捉えることにより、クリティカルパスの所在と安全余裕残量の変遷が可視化が可能となる。具体的には、各時点での余裕パラメータベクトルの成分 (各作業項目のフロート) を横に並べて行ベクトル表示し、各作業項目の余裕パラメータの時系列を各々縦に並べて列ベクトル表示させる。更に、各行での成分の最小値の全てをハイライト表示させる。こうすることにより、各時点でのクリティカルパスの所在は、各行でハイライト表示された作業項目の成分の並びとして顕在化する。また、各行のハイライト表示された数値として安全余裕残量の変遷が顕在化する。

図 8 は、作業項目 23 の建築プロジェクトの実施段階で本手法を適用した結果得られた余裕パラメータベクトルの時系列データである。各行の成分の最小値は赤字で表示されているが、これは各時点でのクリティカルパス上の作業項目のフロートを表している。時系列データの #1 行から #2 行では、この赤字の並び位置が変化しているが、これはクリティカルパスの所在変化が起きていることを表している。具体的には、赤字の並び位置が、d6,d37,d25,d40 から d22,d24,d20, d6,d37,d25,d40 へ変化している。このため、これら余裕パラメータ並びに対応付けられる作業パス D6,D37,D25,D40 から D22,D24,D20, D6,D37,D25,D40 へクリティカルパスが移り変わったことを表している。また、各行の最小値を縦方向に辿ると安全余裕残量の変遷がわかる。例えば図の黄色部分は安全余裕残量の変遷にあたる。なお、負値の出現する #3 行では、このタイミングで契約納期違約確定したことを意味する¹³⁾¹⁴⁾。

以上、本節で示したような重点管理項目を可視化させるためのノウハウは、汎用性があり、様々な業種のプロジェクトマ

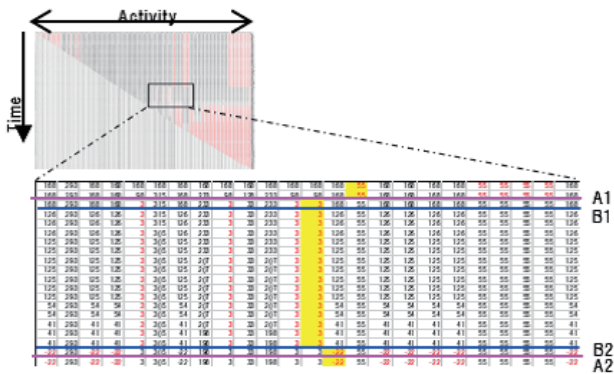


図 9. 重点管理項目を視覚化するプロトタイプシステムの実行結果

マネジメントで活用可能な知見と考えられる。こういったプロジェクトマネジメントに関するノウハウや手法を体系立ててまとめたガイドブック PMBOK (Project Management Body of Knowledge) ²⁵⁾ がある。PMBOK は、アメリカに本部のある PMI (Project Management Institute) が中心になって刊行しているが、プロジェクトマネジメントの世界標準といわれている。本節で提案した可視化手法は、PIMBOK で未だ取り上げられていない、新規に見出された実務上役立つ汎用的知見と考えられる。

以上のような可視化の仕組みを自動化し、管理項目可視化のためのプロトタイプシステムを実装し、住宅建築 ²⁶⁾ や電力設備分解点検修理 (オーバーホール) といった現実的なプロジェクト事例への適用実験を通し、本方法の妥当性を確認した。本システム実行結果の一例として図 9 を示す。図 9 は作業項目 130 程度のオーバーホールプロジェクトのネットワーク・ダイアグラムに本手法を適用した結果得られた余裕パラメータベクトルの時系列データである。各行の成分の最小値、つまりクリティカルパス上の作業項目のフロートは赤字で表示されている。この赤字の並びが変化する A1 行から B1 行、及び B2 から A2 では、クリティカルパスの所在変化が起きていると分かる。また、各行ベクトルの最小値を縦方向に辿ると安全余裕残量の変遷がわかり、負値の出現する A2 行では契約納期違約確定したことが分かる。

5.1.4 遅延リスク耐性の定量化

5. 章冒頭で述べたように、任意の Activity が予期せぬ遅延をきたした際にプロジェクト全体所要時間が契約納期を超過せずに済む可能性の大きさを「プロジェクト全体の遅延リスクへの耐性」と定義し、「遅延リスク耐性」と略記する ²⁷⁾。

遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体上の各点は、「プロジェクトの全体所要時間を変えない Activity レベルでの遅延パターン」(“ADP” と記す) に相当する。このため、遅延リスク耐性の大きさを遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体の大きさを評価することは妥当と考え、遅延リスク耐性の大きさを ADP で評価することとした ¹⁶⁾。

5.1.2 節で示した遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体の例を図 10 に再掲する。本解空間を示す凸多面体の境界及び内部の点は全て ADP に対応付けられる。例えば、境界上の点

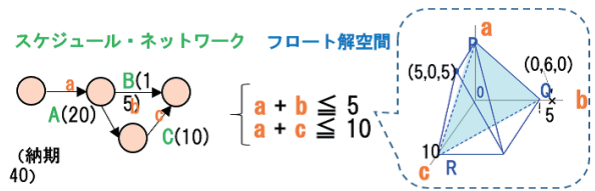


図 10. 遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体の例

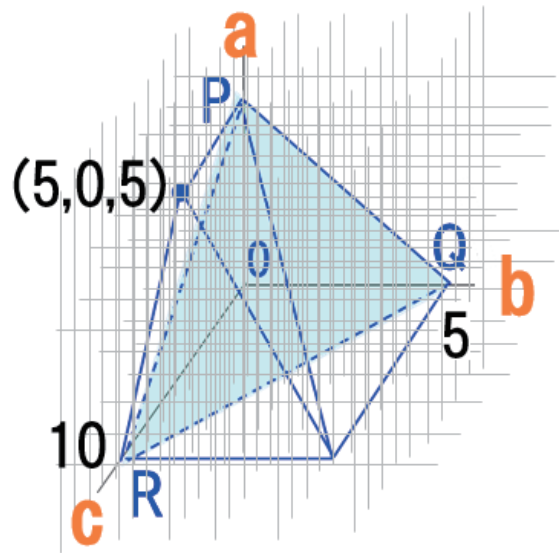


図 11. 遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体に整数格子を被せたイメージ

(5,0,5) は ADP に対応付けられる。実際、Activity A と C が共に 5 日遅延してもプロジェクト全体所要時間は納期 40 日を超過しない。一方、本解空間からはみ出ている点 (0,6,0) は ADP に対応付けられない。実際、Activity B が 6 日遅延すると、たとえ A,C の遅延が 0 であったとしても、全体所要時間は納期 40 日を超過する。

5.2 遅延リスクの計算方法

5.2.1 格子点数による評価

遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体は、係数が +1 の連立一次不等式で表されることから第 1 象限上の原点周りの N 次元凸多面体 (1 ≤ N) を成す。従って、遅延リスク耐性の評価のためには N 次元凸多面体の超体積を求めればよい。しかし、N 次元凸多面体の体積計算は一般化できない。そこで一般化可能な方法として N 次元格子の格子点数として評価することとした。即ち、ある格子幅の N 次元格子を遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体に被せ、当該解空間に含まれる格子点の数をカウントし評価することとした (図 11) ²⁸⁾²⁹⁾。

ただし、フロート値は一経路 (分岐・合流点から次の分岐・合流点までのパス) の中では一定になる性質がある。したがって、遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体を成す余裕パラメータは互いに独立ではない。そのため、上述のような格子点数上げをするためには、まず余裕パラメータ同士の独立・従属関係を調べ、当該解空間のベクトル空間上での次元を明らかにする必要がある。なお、パラメータ同士の独立・従属関

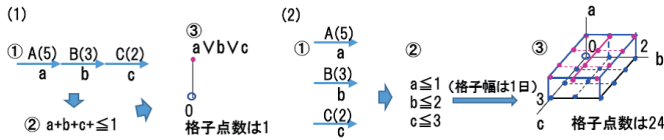


図 12. 遅延リスク耐性 (遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体の大きさ) の算出 (簡単な例)

係は、シンプレックス法で凸多面体の端点を求めるための計算過程から機械的な手順で検出可能であることから、本研究では、シンプレックス法³⁰⁾を用いて本手順を自動化した。

- 5.1.2 節の方法で遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体を表す不等式制約の集まりを求める。
1. の不等式制約を成す余裕パラメータ全体で、フロートが一致する余裕パラメータの集まりを、互いに従属関係にあるパラメータの集まりとして検出し (シンプレックス法使用)、パラメータの統合と式の整理を行い、互いに独立なパラメータから成る不等式制約の集まりとしての遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体の表現形式図 10 を得る。
- 遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体に含まれる格子点の数を求める。
 - 対象とする遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体 (N 凸多面体) の端点を求め、これら端点を手がかりに、解空間を含む出来るだけ小さな領域を切り出す。
 - 切り出された領域内に含まれる格子点各々に関し、遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体に含まれるか否かを 1 点ごとにチェックし含まれる点をカウントしていく。1 点ごとのチェックは、具体的には、不等式制約に当該点の座標を代入し、これが制約条件式を満たすかどうかでチェックしていく。制約条件式を満たせば当該点は遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体に含まれる点であり、満たさなければ含まれない点である。

簡単な例を示す (図 12 参照)。A, B, C の 3 つの activity があり、所要時間がそれぞれ 5 日、3 日、2 日とする。A-B-C が直列につながる場合 (図 12-(1))、余裕パラメータ a, b, c は互いに従属関係にあり、遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体は 1 次元となるため、格子幅 1 でカウントすると、その遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体の大きさは 1 となる。一方、A, B, C のすべてが並行の場合 (図 12-(2))、余裕パラメータ a, b, c は互いに一次独立関係となり、遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体は 3 次元の凸多面体となるため、格子幅 1 でカウントすると、遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体の大きさは 24 となる。

5.2.2 単体体積による評価

計算量の問題を回避するため、遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体の大きさそのものを算出させるといった厳密性を多少犠牲にする代わりに、実用的な計算時間で求められる評価

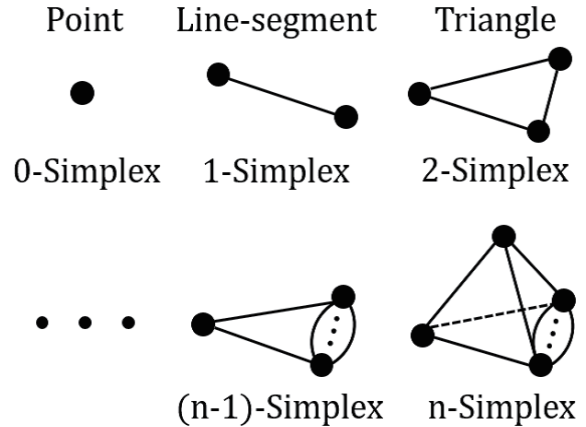


図 13. 0 次元単体 (一点) から n 次元単体までの概形図

指標を定義・導入した方法が、単体体積による評価である。具体的には、個々の Activity の遅延が全体所要時間へ及ぼす影響の度合いを知るためには、遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体を成す N 次元凸多面体の超体積そのものでなくとも、N 次元凸多面体同士の大小関係が分れば良いという考えである。そこで、少なくとも格子点数の大小関係は保存するような指標を見出すための検討を行った。

指標候補として Lp ノルムや原点-重心間の距離など試した中、群を抜いてよい結果を示したのが「N 次元凸多面体 に外接する最大の N 次元単体 (N-Simplex) の超体積」(“NdSV” と記す) である³¹⁾。

n 次元単体 (n-Simplex) とは、(n + 1) 個のアフィン独立な点によって作られる図形のことである。例えば、0 次元単体は一点、1 次元単体は線分、2 次元単体は三角形、3 次元単体は四面体、n 次元単体は n + 1 胞体・・・ようになる (図 13)。

単体は、高次元でも体積計算の一般化が可能で、計算量の問題がない。一般に N 次元単体の超体積 NdSV は次の式で求められる。

$$NdSV = \frac{\sqrt{\det[L^T L]}}{N!}$$

L : N 次元単体のある頂点から出る互いに線形独立な n 本の有向辺の方向ベクトル (l1, ..., ln) を各列成分に持つ m × n 行列

図 14 のような 3 次元単体の頂点の一つである原点 O から出る互いに独立な方向ベクトルは

$$l_1 = P - O = (5, 0, 0), l_2 = Q - O = (0, 5, 0), l_3 = R - O = (0, 0, 10) \text{ となるため、}$$

$$L = (l_1, l_2, l_3) = \begin{pmatrix} 5 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{pmatrix} \text{ となり、}$$

$$L^T = \begin{pmatrix} 5 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{pmatrix} \text{ となる。}$$

したがって、超体積は以下のように求められる。

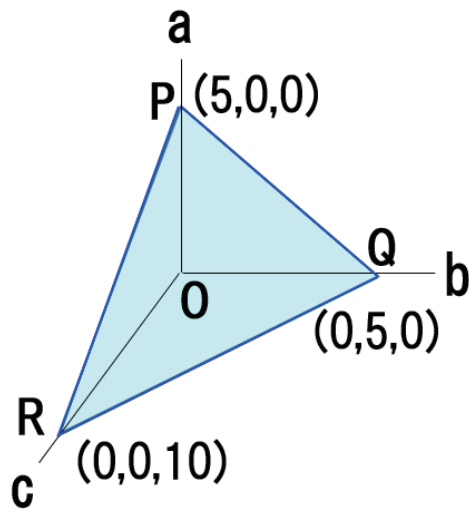


図 14. 3次元単体の一例

$$\begin{aligned}
 NdSV &= \frac{\sqrt{\det[L^T L]}}{3!} \\
 &= 250/3! \\
 &= 41.666\dots
 \end{aligned}$$

本方法で扱う単体超体積は、上の例のような、原点を頂点の一つとする第1象限上の凸多面体である。従って、その超体積は常に、各座標軸の切片の大きさの直積 D を次元数 N の階乗で割った $D / N!$ として求められる。従って、もし NdSV が遅延リスク耐性の大きさを測る指標として妥当ならば、遅延リスク耐性評価は計算量 $O(1)$ となり数秒で可能となる。

NdSV が遅延リスク耐性評価指標として利用可能かどうか調べるための評価実験を行った。具体的には、Activity network の個々の Activity の遅延が遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体に与えるインパクトの大きさを、遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体に含まれる格子点数の減少率と NdSV の縮小率の双方で評価した。そして、格子点数減少率の降順の Activity 列と、NdSV 縮小率の降順の Activity 列の順序関係が一致するかどうかを調べた。このような一致が任意の Activity network で確認されるならば、格子点数による評価の代わりに NdSV による評価が可能となり、格子点計算の計算量の問題は解消されることとなる。

5.1.2 節の図 7 で示した、「あるシステム製品をおさめる仕事」を表す簡単な例に Activity 「外部発注」を追加した Activity Network を図 15 に示す。契約納期を 80 とすると、本例のパラメータ統合・整理前の遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体は 7 つの余裕パラメータから成る以下の連立不等式で表される。

$$\begin{cases}
 a + b + d + f \leq 5 \\
 a + c + e + f \leq 15 \\
 g \leq 0
 \end{cases} \quad (2)$$

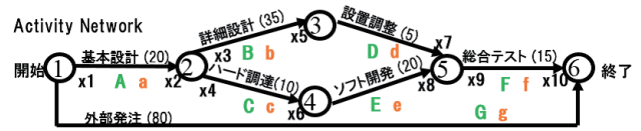


図 15. 「あるシステム製品をおさめる仕事」の Activity Network

遅延パターン	格子点数	単体体積
遅延無し	1692	1666
D_a が 1 遅延	1260	1152
D_b が 1 遅延	1344	1224
D_c が 1 遅延	1584	1568
g が 1 遅延	1128	833

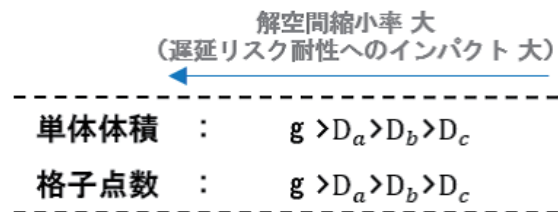


図 16. 各 Activity ごとの 1 日遅延当たりの解空間の縮小率の比較 (例)

パラメータ同士の従属関係より、(a,f)、(b,d)、(c,e) の各々を順に、 D_a 、 D_b 、 D_c にパラメータの統合を行った結果、遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体を表す連立不等式は以下のようになった。

$$\begin{cases}
 D_a + D_b \leq 5 \\
 D_a + D_c \leq 15 \\
 g \leq 0
 \end{cases} \quad (3)$$

この連立不等式を用いて単体体積の妥当性評価実験を行った。まず、Activity の 1 日遅延あたりの解空間縮小率を単体体積指標で評価し結果を降順に並べた。次に、格子幅 1 日での格子点数で評価した結果も同様に並べた。図 16 がその結果である。

これらの結果を対比させたところ、単体体積による評価の順序関係と格子点数による評価の順序関係が完全に一致した。このことから、この例のように小規模のプロジェクトであれば、単体体積による遅延リスク耐性の評価は可能であるといえる。

5.2.3 既存手法の問題点について

格子点数による評価では、N 次元凸多面体の格子点数上げに掛かる計算量は次元の指数オーダーとなるため、次元数が上がったときに膨大な計算時間がかかってしまう。15 次元の遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体の分析において、15 次元凸多面体の格子点を格子刻み幅 1 日で数え上げた場合、最大で 20 時間程度かかった。実務レベルのプロジェクトに適用

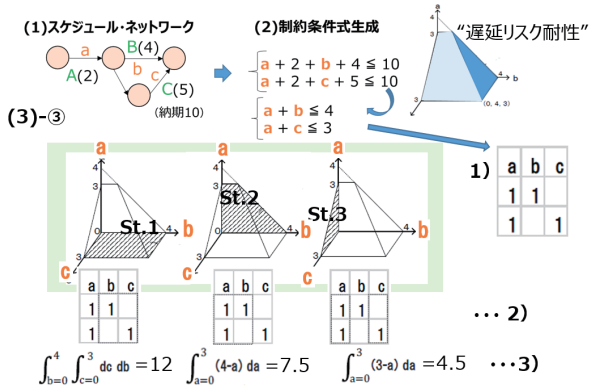


図 17. 遅延リスク評価部の実現方法 (本稿での方法)

するため、アクティビティ数が 1000 程度の計算を行いたいため、この方法は現実的ではない。逆に単体体積による評価では、次元数が上がると精度が落ちてしまうといった計算精度の問題がある。

6. 提案手法

遅延リスク評価部の実現方法として今回新たに導入する第 3 の手法について説明する。

6.1 方法

本方法は、スケジュール・ネットワーク全体の余裕を表す N 次元正凸多面体 (遅延リスク耐性) から、余裕パラメータを積分変数、被積分変数として用いる積分計算、すなわち体積計算の一般化が可能な構造を抽出し、抽出された構造の大きさを指標化とするというものである。ここで、抽出される「体積計算の一般化が可能な構造」は、その構造検出から体積計算まで、システマティックな手順で実行できるものとなる。本方法の手順は次のとおりである (図 17)。

1. 制約条件式の各パラメータの有る/無しを表す 1/0 行列を生成する (図 17-③-1、(6.1.1))。
2. この 1/0 行列を使って、 N 次元正凸多面体 (遅延リスク耐性) から体積計算可能な構造を抽出する。これは、「どの 2 列をとってきても、片方の列の 1 の立つ行がもう一方の列の 1 の立つ行に含まれているか、または、互いに素」となるような列セットとして、すべて抽出される (図 17-③-2、(6.1.2))。
3. 検出された構造の大きさを積分計算する (図 17-③-3、(6.1.3))。

また、遅延リスク評価方法の性能は、アクティビティ (作業) の遅延がスケジュール・ネットワーク全体の余裕へ与える「感度」、つまり N 次元正凸多面体の大きさの変化量を利用して評価する考え方が、先行研究で既に提案されている。しかし、これまでの第 1 の方法 (格子点数による評価)、第 2 (単体体積による評価) の方法では、領域そのものの格子点数の変化量や、単体体積の縮退率を直接求め、感度解析すればよかったのに対し、本方法では、領域そのものではなく、その検出構造の集まりが評価対象となる。そのため、領域そのものの縮退率による直接的な感度解析はできない。そこで、本方法の評価

スケジュール・ネットワーク(全体納期10)

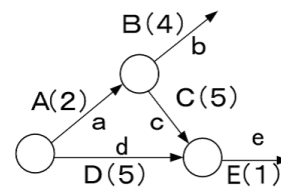


図 18. 5次元のスケジュール・ネットワーク例

	a	b	c	d	e
1	1	1			
1			1		1
				1	1

図 19. 5次元のスケジュール・ネットワークの 1/0 行列

方法として、検出構造の縮退率の総和として全体の感度を指標化する感度解析の方法を新たに考案した (6.1.4)。

以下、「1/0 行列」の生成から積分計算までを図 18 に示すような、5次元のスケジュール・ネットワークを例として説明を行い、感度解析を、より単純な図 21 に示す 3次元のスケジュール・ネットワークを例として説明を行う。

6.1.1 「1/0 行列」の生成

まず、スケジュール・ネットワークに対応する 1/0 行列を生成する。例えば、図 18 に示すスケジュール・ネットワークの場合には、プロジェクトの開始から完了までのパス毎に以下の制約条件式が生成される。

$$a + b + 6 \leq 10 \rightarrow a + b \leq 4 \quad (4)$$

$$a + c + e + 8 \leq 10 \rightarrow a + c + e \leq 2 \quad (5)$$

$$d + e + 7 \leq 10 \rightarrow d + e \leq 3 \quad (6)$$

ここで、 $a \sim e$ はそれぞれアクティビティ A~E に対応する余裕パラメータであり、上記式 (4)、(5)、(6) から図 19 に示す「1/0 行列」が生成される。この 1/0 行列は、各行が上記制約条件式 (4)~(6) のいずれかに対応し、各列が余裕パラメータ $a \sim e$ のいずれに対応する行列である。1/0 行列は、制約条件式に余裕パラメータ $a \sim e$ の項がある要素の値を 1 とし、それ以外の要素の値を 0 とする。例えば、1 番上の行は、式 (4) に対応する、式 (4) では、余裕パラメータ a, b の項が存在するため、 a の列、 b の列の要素に 1 が設定され、他の列の要素は 0 が設定されている。ちなみに、スケジュール・ネットワークから生成される制約条件式は、余裕パラメータを要素とするベクトル空間におけるプロジェクトが遅延したときの余裕を表す N 次元正凸多面体の領域のことである。そのため、今回生成した「1/0 行列」を元にする事で、 N 次元正凸多面体から体積計算一般化が可能な構造の検出を行うことができる。

6.1.2 体積計算一般化が可能な構造の検出

高次元の N 次元正凸多面体の体積を求めることは非常に困難であるため、本手法では、体積計算が容易な構造を、 N 次元

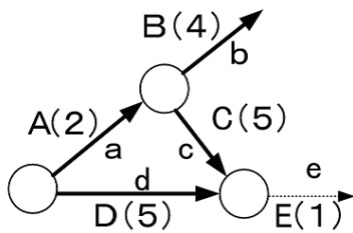


図 20. 5次元のスケジュール・ネットワークから検出される構造例

正凸多面体から断面として可能な限り検出し、冗長なものは除いたのちに、その全構造を総合的に評価する。体積計算が容易な構造とは、1つの積分式として一般化して表すことが可能なN次元正凸多面体の断面である。つまり、体積計算の一般化が可能な構造とは、N次元正凸多面体から余裕パラメータを積分変数、被積分変数として用いて積分計算可能な構造のこととなる。この条件を満たすために、体積計算の一般化が可能な構造は次の性質を持つ1/0行列の集合となる。

- 集合のうち1/0行列のどの2列をとってきても、以下のどちらかが成り立つ
 - － 片方の列の1の立つ行が、もう片方の列の1の立つ行を完全に包含している
 - － 片方の列の1の立つ行が、もう片方の列の1の立つ行と互いに素になっている

ここで互いに素とは、1となる行が一致しないことを意味する。よって、言い換えると、この集合は要素の値が1となる行に包含関係が成立する列同士と、1となる行が全く一致しない列同士とで構成される行列の集合である。

図 18 に示すスケジュール・ネットワークの場合、このような1/0行列の1つに、図 19 の点線で囲まれる1/0行列がある。この1/0行列では、アクティビティA、B、C、Dは含まれるが、アクティビティEは含まれていない。列aと列eは上記条件を満たさない(互いに1となる行と、値が異なる行とがある)ためである。図 20 では、点線で囲まれる1/0行列に含まれるアクティビティは実線で示され、含まれないアクティビティは点線で示されている。この実線で示されたアクティビティA、B、C、Dが今回検出された構造の一つである。このような検出を行うことで、積分計算時に任意変数とできる余裕パラメータの値を判別できるため、式の一般化が可能となる。すなわち、体積の積分計算の一般化が可能となる。また、この構造検出の条件で検出される構造には、アクティビティA、B、Cで構成される構造や、アクティビティA、Bのみで構成される構造も存在する。しかし、これらの構造は、アクティビティA、B、C、Dで構成される構造に包含されているため、冗長なものとして除く必要がある。さらに、冗長な構造を除いても検出される構造は1つではないため、感度解析の際には、それぞれの体積計算を行った全構造を総合的に評価する必要がある。

6.1.3 積分計算

積分計算の方法を、節 6.1.2 で検出されたアクティビティA、B、C、Dで構成された構造を例として説明する。節 6.1.1

の式(4)、(5)、(6)において、構造に含まれるアクティビティの余裕パラメータは左辺のままにし、それ以外のパラメータは任意の定数として右辺に移行する。すると、以下の式となる。

$$a + b \leq 4 \tag{7}$$

$$a + c \leq 2 - e \tag{8}$$

$$d \leq 3 - e \tag{9}$$

この式(7)、(8)、(9)に基づいて、抽出された構造の体積を求める積分計算を行う。この積分計算は以下の手順で行われる。

1. 抽出された構造の列(余裕パラメータ)間の包含関係を明かにする
2. 包含関係にある列(余裕パラメータ)を、積分変数と被積分変数の関係に変換し、互いに素な関係にある列(余裕パラメータ)を重積分の関係に変換する

例の構造に手順1の作業を行うと、列aで1となっている行に、列b,cで1となっている行はすべて包含されている。よって、この余裕パラメータの包含関係は次の式となる。

$$(a(b, c), d) \tag{10}$$

次に手順2では、包含関係である余裕パラメータa(b,c)について以下の積分演算を規定する。

$$\int_{a=0}^{2-e} (4-a)(2-e-a)da \tag{11}$$

この積分式は、1となる行が最多となる第1の列に対応するaを積分変数とし、1となる要素が第1の列で1となる要素にすべて含まれる第2の列の余裕パラメータb,cを被積分変数としている。よって、式(7)、(8)より、余裕パラメータb,cにb=4-a, c=2-e-aを代入することができる。また、積分変数aの取り得る上限は、積分変数aを持つ式(7)、(8)の右辺の最小変数(積分変数が取り得る最小値)2-eとなる。さらに、互いに素な関係にある(1となる行が全く一致しない列の)余裕パラメータa,d同士については、以下の重積分を規定する。

$$\int_{a=0}^{2-e} f(a)da \int_{d=0}^{3-e} f(d)d(d) \tag{12}$$

したがって、この構造の大きさを示す全体の積分式は、(11)と(12)を組み合わせた以下の積分式となる。

$$\int_{a=0}^{2-e} (4-a)(2-e-a)da \int_{d=0}^{3-e} d(d) \tag{13}$$

なお、任意変数(任意の値を設定可能な変数)e=0の時最大となるので、代入して積分式(13)を計算すると、この構造(断面)の最大の大きさ20を求めることができる。

6.1.4 感度計算

感度計算では、スケジュール・ネットワークに対応する正凸多面体から検出された体積計算の一般化が可能な構造の大きさ又は遅延に対する感度を、遅延リスク耐性の指標値として求める。感度とは、アクティビティが単位時間遅延した場合に、正凸多面体から抽出された体積計算の一般化が可能な構造の変化量である。

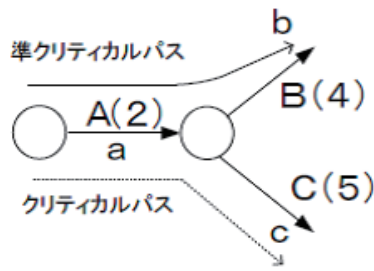


図 21. 3次元のスケジュール・ネットワーク例

$$\begin{cases} a+b+6 \leq 10 \\ a+c+7 \leq 10 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} a+b \leq 4 \\ a+c \leq 3 \end{cases} \rightarrow \begin{matrix} a & b & c \\ 1 & 1 & \\ 1 & & 1 \end{matrix}$$

図 22. 3次元のスケジュール・ネットワークの制約条件式と1/0行列

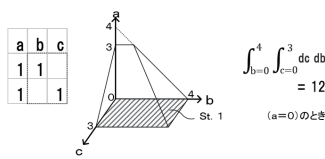


図 23. アクティビティ B、C からなる構造

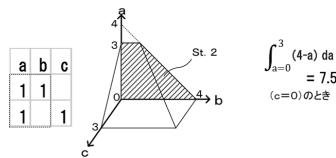


図 24. アクティビティ A、B からなる構造

正凸多面体から抽出された体積計算の一般化が可能な構造の変化量（感度）と遅延リスク耐性との相関性について説明する。この相関性を説明するために、図 21 に示すスケジュール・ネットワークを定義する。このスケジュール・ネットワークはアクティビティ A→アクティビティ B というパスと、アクティビティ A→アクティビティ C というパスを有している。アクティビティ C の所要日数はアクティビティ B の所要日数より多いため、このスケジュール・ネットワークではアクティビティ A→アクティビティ C がクリティカルパスとなり、アクティビティ A→アクティビティ B が準クリティカルパスとなる。

このスケジュール・ネットワークによれば、図 22 に示す制約条件式及び 1/0 行列が生成される。図 22 に示す 1/0 行列からは、図 23、図 24 及び図 25 に示すように、点線で示す 1/0 行列を抽出することが可能である。各 1/0 行列から体積計算の一般化が可能である構造（断面）St.1～St. 3 の面積（12、7.5、4.5）を算出することで、St.1～St. 3 のそれぞれの余裕を知ることができる。ここで、アクティビティ A が 1 日遅延したとする。この場合、図 26 に示すように、正凸多面体は実線から点線のように変化する。この変化分が遅延に対する感度を表す。例えば、断面 St.1 の変化分は以下の式 (14) に示すように、 $a = 0$ のとき 6 となる。

$$\int_{b=0}^3 db \int_{c=0}^2 dc = 6 \tag{14}$$

表 1. 断面 St.1～St. 3 が 1 日遅延した時の感度に関する指標

余裕パラメータ	a	b	c
遅延後の余裕 (St.1)	6.0	8.0	9.0
遅延後の余裕 (St.2)	4.0	6.0	4.5
遅延後の余裕 (St.3)	2.0	2.0	4.5
余裕/元の余裕 (St.1)	0.5000	0.6667	0.7500
余裕/元の余裕 (St.2)	0.5333	0.8000	0.6000
余裕/元の余裕 (St.3)	0.4444	0.4444	1.0000
縮退率 (St.1)	0.5000	0.3333	0.2500
縮退率 (St.2)	0.4667	0.2000	0.4000
縮退率 (St.3)	0.5556	0.5556	0.0000
縮退率総和	1.5222	1.0889	0.6500

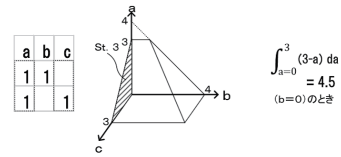


図 25. アクティビティ A、C からなる構造

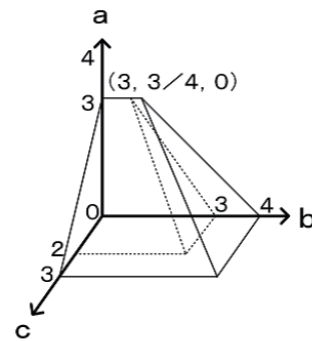


図 26. アクティビティ A が 1 日遅延した場合の 3次元のスケジュール・ネットワークにおける正凸多面体

ここで、それぞれのアクティビティ A(a)、B(b)、C(c) がそれぞれ 1 日遅延した時の感度に関する指標を比較した表を表 1 に示す。各断面 St.1～St. 3 の元の余裕は、図 23～図 25 に示される断面 St.1～St. 3 の面積であり、遅延後の余裕は断面 St.1 であれば、図 26 に示す面積である。余裕/元の余裕はこれらの面積の比であり、断面 St.1 における遅延後の余裕 6.0 と元の余裕 12 の比は 0.5000 となる。陥そして、対応する断面の面積がどれくらい縮小するかを示す尺度を縮退率とし、以下の式で表す。

$$\text{縮退率 (断面の感度)} = 1 - (\text{遅延後の余裕}) / (\text{元の余裕}) \tag{15}$$

表 1 では、アクティビティ A に対する断面 St.1～St. 3 の縮退率の総和が示されている。アクティビティ毎の断面 St.1～St. 3 の縮退率の総和は、アクティビティ A、B、C について、それぞれ 1.5222、1.0889、0.6500 となっている。この全体余裕縮退率の総和を降順にソートすると、クリティカル性の高いアクティビティ順 (A → C → B) にならぶ。これは、全体余裕縮退率の総和は、遅延リスク耐性の大きさと相関し、これを遅延リスク耐性の大きさの指標値として用いることができることを示している。

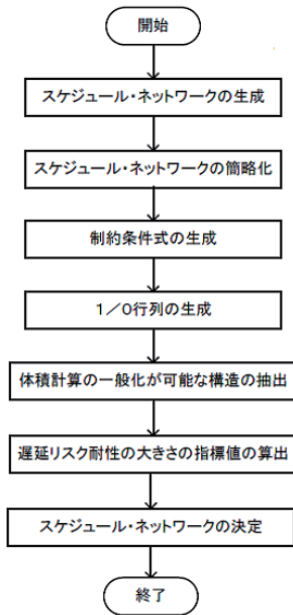


図 27. プロジェクトマネジメントシステムの動作を示すフローチャート

6.2 実装

次に、本提案手法の実装方法について示す。また、実装時のシステムの動作を示すフローチャートを図 27 に示す。4. 章で述べたように、システムの全体像は図 3 のようになっており、それぞれの部門がどの作業を行うかを説明する。

6.2.1 スケジュール・ネットワーク生成部

スケジュール・ネットワーク生成部は、図 27 における「スケジュールネットワークの生成」と「スケジュールネットワークの決定」を行う。「スケジュールネットワークの生成」とは、4. 章で述べたように、プロジェクトにおけるアクティビティ間の論理的順序関係と、各アクティビティそれぞれの所要時間とに基づいて、時間、原価及び資源の制約条件を満たすスケジュール・ネットワークを生成し、生成されたスケジュール・ネットワークの情報を、遅延リスク評価部の条件式生成部に送る。また、「スケジュールネットワークの決定」では、遅延リスク評価部から送られた指標値に基づいて、複数生成されたスケジュール・ネットワークの中から、遅延リスク耐性の大きさが最大のスケジュール・ネットワークを決定する。

6.2.2 条件式生成部

条件式生成部は、図 27 における「スケジュールネットワークの簡略化」と「制約条件式の生成」を行う。「スケジュール・ネットワークの簡略化」と「制約条件式の生成」は、節 5.1.2 に示した方法で生成を行い、構造抽出部へと制約条件を送る。

6.2.3 構造抽出部

構造抽出部は、図 27 における「1/0 行列の生成」と「体積計算の一般化が可能な構造の抽出」を行う。「1/0 行列の生成」では、節 6.1.1 に示した方法で生成を行う。そして、「体積計算の一般化が可能な構造の抽出」では、生成した 1/0 行列をもとに、節 6.1.2 に示した方法で構造の抽出を行う。体積計算の一般化が可能な構造の抽出処理を示すフローチャートを図 28 に示す。

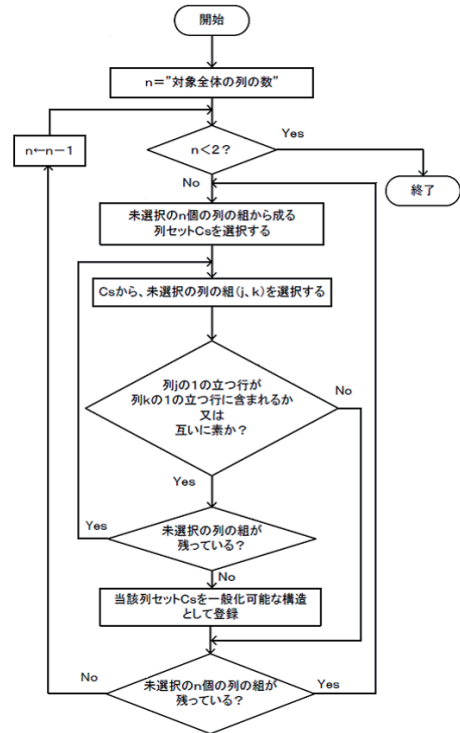


図 28. 体積計算の一般化が可能な構造の抽出処理を示すフローチャート

6.2.4 指標値算出部

指標値算出部は、図 27 における「遅延リスク耐性の大きさの指標値の算出」を行う。「遅延リスク耐性の大きさの指標値の算出」とは、構造抽出部で抽出した構造の体積を、節 6.1.3 の方法で体積計算し、節 6.1.4 の方法で感度解析を行い、指標値を算出する。そして、算出した指標値を、スケジュール・ネットワーク生成部に送る。

7. 評価実験

遅延リスク評価のために新たに考案した第 3 の手法の性能を評価するための実験を行った。

7.1 実験目的

実験目的は、次の 2 つである。

1. 提案手法 (第 3 の手法) の計算時間と計算精度を評価することである。
2. 第 3 の方法の計算量抑制の可能性の評価

7.2 実験方法

7.2.1 目的 1 の実験方法

計算精度は感度解析の結果の正しさと評価し、計算時間はその感度解析に掛かる時間で評価する。しかし、感度解析の正解は明らかでない。そこで、提案手法 (第 3 の手法) の感度解析の結果の正しさは、先行研究での第 1 の方法 (格子点数による評価) 及び、第 2 の方法 (N 次元正凸多面体に内接する最大の単体の体積に基づく評価) による感度解析の結果との一致率を求め、その一致率から第 3 の方法の精度を推定する方法を取ることとした。また、この推定は、第 1、第 2 の計算方法の特徴を根拠として行うこととした。以下、各々の特徴を再掲する。

- 第1の方法は、計算量の問題があり、次元の高いケースでは簡単に計算不能となる。具体的には、格子幅を1とした場合、10次元程度で数時間の計算時間を要するようになり、15次元を超えると数日かかるケースが出てくる。また、それ以上の次元では計算不能となる。一方、計算精度に関しては、格子幅を十分細かく設定することで計算精度は高くなるが、格子幅の細かさと計算量とはトレードオフの関係にあるため、精度を上げるためにも結果的には計算量の問題に行き当たることとなる。
- 第2の方法の計算量は次元Nのオーダーであり、計算量の問題はほとんどない。しかし、高次元のケースでは、精度の保証ができないという問題が生じる。全てのN次元正凸多面体の大きさを、それに内接する最大の単体で評価するため、次元Nが大きくなるほど評価対象のN次元正凸多面体との誤差が大きくなるためである。しかし、15次元までのケースでは、第1の方法と同程度の精度を持つことが、実験的に確認できている。

以上の第1、第2の計算方法の特徴を踏まえると、次のような推定ができる。例えば、第3の方法による感度解析の結果が、格子幅の十分細かい第1の方法による感度解析の結果との一致度が高ければ、第3の方法による当該結果は概ね正しいと推定できる。また、例えば、第3の方法による感度解析の結果が、第1の方法、第2の方法による感度解析結果と双方との一致率が高ければ、第3の方法による結果の正しさはより確かなものとして推定される。また、例えば、第3の方法による感度解析の結果が、格子幅の荒い第1の方法による結果との一致率より、第2の方法による結果との一致率が高いならば、第1、第2、第3の方法による互いの一致率や、評価対象のN次元正凸多面体の次元の大きさ等から総合的に判断される。もし互いの一致率がある程度高く、次元がさほど大きくなければ、第2の方法による解析結果はある程度信頼できるものと考えられ、結果的に、第3の方法による結果の正しさも概ね確かなものと推定される。また、例えば、第3の方法による感度解析の結果が、格子幅の荒い第1の方法による結果との一致率より、第2の方法による結果との一致率が高いならば、第1、第2、第3の方法による互いの一致率や、評価対象のN次元正凸多面体の次元の大きさ等から総合的に判断される。もし互いの一致率がある程度高く、次元がさほど大きくなければ、第2の方法による解析結果はある程度信頼できるものと考えられ、結果的に、第3の方法による結果の正しさも概ね確かなものと推定される。

7.2.2 目的2の実験方法

本稿の冒頭で述べた通り、より大規模なプロジェクトのケースを扱う場合を想定し、精度と計算量のトレードオフを見るための評価実験を行った。その方法は、第3の方法の計算過程で検出される検出構造を感度解析に使用する数によって、解析結果の精度がどの程度違ってくるかを調べるというものである。即ち、全検出構造がM個の場合、M個全てを使って感度解析した場合の結果とM-j個(1 ≤ j ≤ M-1)使用した場合の結果との一致率を各々求めることにより、解析に使用する検出構造の数の影響を調べることとした。もし、使用す

る検出構造の数を抑えることによる精度の低下が小さいならば、第3の方法は精度を保ったまま計算量を抑えることが可能な方法と言える。言い換えると、第3の方法の精度は検出構造の数に依存し難いということが言える。逆に、検出構造の数を抑えることによる精度の低下が大きいならば、第3の方法の精度は検出構造の数に依存する可能性が考えられる。

なお、適用例としては、現実に実施されたプロジェクトを模して作成されたテスト用プロジェクトのスケジュール・ネットワークを使用する。具体的には、中規模ガス処理プラント建設プロジェクト(JAPEXプロジェクト)³²⁾の15次元版と24次元版、電力設備の解体修理点検プロジェクト(13次元、Activity数150程度)³³⁾を用いる。

7.3 適用例1 (JAPEXプロジェクト、15次元、Activity数15)

JAPEX EPC Training Project (JAPEXプロジェクト)³²⁾のスケジュール・ネットワークを適用例とした実験結果を示す。JAPEXプロジェクトとは、中東・北アフリカ地域において中規模ガス処理プラントを建設するEPCフルターンキープロジェクトである。スケジュール・ネットワーク(図29)は実在のプロジェクトを抽象化し研究用にリメイクされ提供されたものである。提供されたオリジナルのスケジュール・ネットワーク(24次元)は節7.5で扱うとし、本章では、オリジナルを15次元に簡略化したスケジュール・ネットワークでの実験結果を示す。ここで15次元というのは、格子幅1での方法1による感度解析がぎりぎり可能な最大の次元ということである。

7.3.1 感度解析の準備

まず、プロジェクトのスケジュール・ネットワーク(図29)のアクティビティ間の順序関係をネットワーク構造で表し、各作業パスの長さの制約(納期制約)をベクトル空間上のN次元正凸多面体領域(N=15)として表すと、以下の通りとなった。

$$a + b + e + g + m + q < 3 \quad (16)$$

$$a + b + f + j + q < 5 \quad (17)$$

$$a + b + f + k + q < 16 \quad (18)$$

$$a + b + f + k + p + r < 4 \quad (19)$$

$$a + c + k + q < 14 \quad (20)$$

$$a + c + k + p + r < 2 \quad (21)$$

$$a + s + k + p + r < 3 \quad (22)$$

$$a + s + k + q < 15 \quad (23)$$

$$a + b + e + g + n + r < 3 \quad (24)$$

$$a + b + e + h + n + r < 2 \quad (25)$$

a, b, c, e, f, g, h, j, k, m, n, p, q, r, s は、順に、アクティビティA, B, C, E, F, G, H, J, K, M, N, P, Q, R, Sの余裕パラメータを表す。

7.3.2 感度解析と結果

次に、遅延リスク評価のための第1の方法(格子点数による評価方法)、第2の方法(N次元正凸多面体に内接する最大の単体の体積に基づく評価方法)、及び、第3の方法(検出構造の大きさに基づく評価方法)により、感度解析を行った。

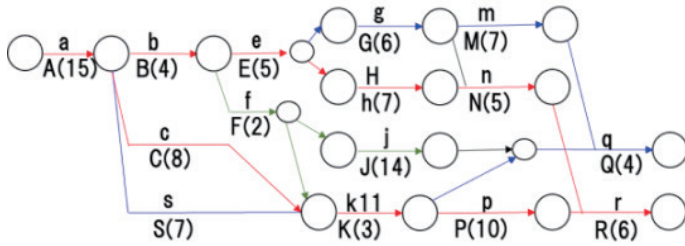


図 29. 簡略化した JAPEX プロジェクト (15 次元) のスケジュール・ネットワーク

格子点数：**a>r>b>e>n>p=k>h>c>q>g>m>f>s>j**
 単体体積：**a>r>b>e>p=k>n>h>c>q>g>m>f>s>j**
 提案手法：**a>r>b>e>n>h>k>p>c>q>g>m>f>j>s**

図 30. 簡略化した JAPEX プロジェクト (15 次元) の感度解析結果

感度解析の結果を(図 30)に示す。上から、第 1 の方法(格子幅 1 日)、第 2 の方法(15 次元単体)、第 3 の方法(検出構造 7 個中 7 個使用)による結果を表している。即ち、アクティビティ 1 日遅延当たりの遅延リスク耐性(15 次元正凸多面体)の縮退率の降順に、結果を表示している。(結果は余裕パラメータベクトルのアルファベットで表示している。)つまり、遅延の影響がスケジュール・ネットワーク全体の余裕へ与える影響が大きいアクティビティから順に(降順に)表示しているということである。各セグメントの色の意味は、大きく 3 つに分けて説明すると、赤は本例の全てのクリティカルパス(制約条件式 (21)、(25) に対応付けられるパス)上に乗るアクティビティ、青は準クリティカルパス(制約条件式 (66)、(22)、(24) に対応付けられるパス)に乗るアクティビティ、黒はクリティカルパスに乗らないアクティビティ(の余裕パラメータ)を意味する。

分析 1 (クリティカル性)

以上にに基づき、まず、新たに考案した第 3 の方法が概ね正しいかどうかをチェックする。先行研究までで既にわかっている知見として、クリティカル性の高いパスによりたくさん乗るアクティビティの遅延ほど遅延リスク耐性へ与える影響が大きい(N 次元正凸多面体の縮退率が大きい)ということ、つまり、スケジュール・ネットワーク全体の余裕へ与える影響が大きいということがある。したがって、もし今回考案した新たな第 3 の手法による解析結果がそのような結果になっていれば、つまり、感度の降順に並べたときに、赤、青、黒の順になっていれば、本手法の正しさが最低限保証されたということになる。そして、(図 29)より、第 3 の方法による感度解析結果は、赤、青、黒の順になっている。以上のことから、本方法は概ね正しいとわかる。

分析 2 (計算精度と計算時間)

次に、更に細かい分析として、第 3 の方法の精度を評価する。これは、各方法による感度解析の結果の一致率で評価する。こ

表 2. 簡略化した JAPEX プロジェクト (15 次元) の方法ごとの一致率

第 3 の方法と第 1 の方法 (格子幅 0.5)	103/105	98 %
第 3 の方法と第 2 の方法	100/105	95 %
第 1 の方法と第 2 の方法 (参考)	103/105	98 %

表 3. 簡略化した JAPEX プロジェクト (15 次元) の方法ごとの計算時間

第 1 の方法	約 90 時間
第 2 の方法	約 2~3 秒
第 3 の方法	15.8 秒

表 4. 簡略化した JAPEX プロジェクト (15 次元) の使用構造数ごとの一致率

7 個中 6 個での一致率 (平均)	99.57 %
7 個中 5 個での一致率 (平均)	99.19 %
7 個中 4 個での一致率 (平均)	98.94 %
7 個中 3 個での一致率 (平均)	98.91 %
7 個中 2 個での一致率 (平均)	97.66 %
7 個中 1 個での一致率 (平均)	96.57 %

こでの一致率とは、例えば、第 3 の方法の第 1 の方法との一致率であれば、第 3 の方法による結果の順序関係(つまり、アクティビティの降順の順序関係)と第 1 の方法による結果の順序関係との一致率である。結果を表 2 に示す。ここで、一致率の分母は 15 個のアクティビティの全ての組み合わせで ${}^{15}C_2 = 105$ である。

以上のように、第 3 の方法による感度解析の結果は、格子幅の細かい故に精度が高いと言える第 1 の方法、及び、低次元故に精度の保証されている第 2 の方法による感度解析結果双方との一致率が高かった。このことから、第 3 の方法による結果の正しさは非常に確かなものと推定される。また、計算時間を表 3 に示す。

分析 3 (第 3 の方法の計算量抑制の可能性の評価)

精度と計算量のトレードオフを評価する。第 3 の方法で検出される一般化可能な構造は全部で 7 個であり、分析 2 までは 7 個中 7 個使用した感度解析の結果を用いた。本実験では、更に、7 個中 6 個、7 個中 5 個、… のように、得られた検出構造の一部のみ使って感度解析した結果(感度の降順のアクティビティの順序関係)も求めた。そして、最も精度の高い 7 個中 7 個使った場合の感度解析の結果との一致率を算出した。結果を表 4 に示す。なお、「7 個中 6 個での一致率」とは、「検出構造 7 個中 6 個による感度解析の結果の 7 個中 7 個による感度解析の結果との一致率」の意味である。

表 4 からわかるように、本例の場合は、感度解析に使用する検出構造の数の影響はあるが、ごく僅かという結果が得られた。つまり、第 3 の方法は精度を保ったまま計算量を抑えることが可能な方法と考えられる。言い換えると、第 3 の方法の精度は検出構造の数に依存し難い可能性が考えられる。

7.4 適用例3 (電力設備の解体修理点検プロジェクト 13次元、Activity数150程度)

次に、電力設備の解体修理点検プロジェクト³³⁾のスケジュール・ネットワークを適用例とした実験結果を示す。Activity数が他の適用例と比べ、非常に多く作業のパスも多く複雑である。電力設備の解体修理点検とは、一般にオーバーホールといわれるものであり、受変電設備を健全な状態に保つため、定期的な点検・部品交換・診断及び更新等を実施するものである。本適用例は、国内の实在の大規模電力設備に対し、実際に行われたオーバーホールのプロジェクト・スケジュールのガントチャートを本研究でスケジュール・ネットワーク化したものとなっている。なお、オーバーホールにかかる期間は設備の内容や規模によって様々だが、本例では半年弱の規模のものとなっている。本適用例の特徴は、他の適用例と比べ、Activity数が非常に多いということである。また、本手法の計算量を引き上げる原因となる並行作業パスの数は先ほどのJAPEX15次元の例よりは若干少なめである。スケジュール・ネットワークは図31となっている。

7.4.1 感度解析の準備

まず、プロジェクトのスケジュール・ネットワーク(図31)のアクティビティ間の順序関係をネットワーク構造で表し、各作業パスの長さの制約(納期制約)をベクトル空間上のN次元正凸多面体領域(N=13)として表すと、以下の通りとなった。

$$\begin{aligned}
 a+b+d+f+j+k+l &< 530 & (26) \\
 a+b+h+i+j+l &< 5 & (27) \\
 a+b+d+f+g+j+l &< 615 & (28) \\
 a+c+d+e+f+g+l &< 627 & (29) \\
 a+b+h+i+j+m &< 5 & (30) \\
 a+c+d+f+j+k+l &< 527 & (31) \\
 a+b+d+h+j+m &< 5 & (32) \\
 a+c+d+e+f+g+m &< 627 & (33) \\
 a+c+d+h+j+l &< 2 & (34) \\
 a+b+d+f+j+k+l &< 530 & (35) \\
 a+b+d+f+g+j+l &< 615 & (36) \\
 a+b+f+g+i+j+l &< 615 & (37) \\
 a+c+d+e+h+l &< 17 & (38) \\
 a+b+d+e+h+l &< 20 & (39) \\
 a+c+d+e+h+m &< 17 & (40) \\
 a+b+d+e+f+g+m &< 630 & (41) \\
 a+b+d+e+f+g+l &< 630 & (42) \\
 a+b+f+i+j+k+l &< 530 & (43) \\
 a+b+d+e+f+k+m &< 545 & (44) \\
 a+b+f+g+i+j+m &< 615 & (45) \\
 a+c+d+h+j+m &< 2 & (46)
 \end{aligned}$$

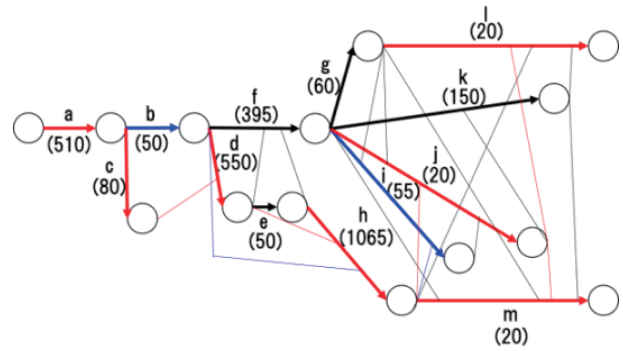


図31. 電力設備の解体修理点検プロジェクトのスケジュール・ネットワーク

格子点数： $a>h>j>l>m>d>b>c>i>e>f>k>g$
 単体体積： $a>h>j>d>c>l>m>b>i>e>f>k>g$
 提案手法： $a>h>j>l>m>d>c>b>i>e>f>k>g$

図32. 電力設備の解体修理点検プロジェクトの感度解析結果

$$\begin{aligned}
 a+c+d+e+f+k+m &< 542 & (47) \\
 a+c+d+f+j+k+m &< 527 & (48) \\
 a+c+d+f+g+j+m &< 612 & (49) \\
 a+c+d+f+g+j+l &< 612 & (50) \\
 a+b+d+h+j+l &< 5 & (51) \\
 a+c+d+e+f+k+l &< 542 & (52) \\
 a+b+d+e+f+k+l &< 545 & (53) \\
 a+b+d+e+h+m &< 20 & (54) \\
 a+b+f+i+j+k+m &< 530 & (55)
 \end{aligned}$$

$a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, m$ は、順に、アクティビティ A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, M の余裕パラメータを表す。

7.4.2 感度解析と結果

次に、遅延リスク評価のための第1の方法(格子点数による評価方法)、第2の方法(N次元正凸多面体に内接する最大の単体の体積に基づく評価方法)、及び、第3の方法(検出構造の大きさに基づく評価方法)により、感度解析を行った。今回のスケジュール・ネットワークでは、行程日数とパスの数が多く、格子点計算に膨大な時間がかかってしまうため、第1の方法の行程日数を10分の1にして計算を行った。

感度解析の結果を(図32)に示す。上から、第1の方法(格子幅1日、工程日数10分の1)、第2の方法(13次元単体)、第3の方法(検出構造6個中6個使用)による結果を表している。即ち、アクティビティ1日遅延当たりの遅延リスク耐性(13次元正凸多面体)の縮退率の降順に、結果を表示している。(結果は余裕パラメータベクトルのアルファベットで表示している。)つまり、遅延の影響がスケジュール・ネットワーク全体の余裕へ与える影響が大きいアクティビティから順に(降順に)表示しているということである。各セグメントの色の意味は、大きく3つに分けて説明すると、赤は本例の全てのクリティカルパス(制約条件式(34)、(46)に対応付けられるパス)上に乗るアクティビティ、青は準クリティカルパス(制約条件式(27)、(30)、(32)、(51)に対応付けられるパス)に乗るアクティビティ、黒はクリティカルパスに乗らないアクティ

ビティ (の余裕パラメータ) を意味する。

分析1 (クリティカル性)

以上に基づき、まず、新たに考案した第3の方法が概ね正しいかどうかをチェックする。先行研究までで既にわかっている知見として、クリティカル性の高いパスによりたくさん乗るアクティビティの遅延ほど遅延リスク耐性へ与える影響が大きい (N次元正凸多面体の縮退率が大きい) という事、つまり、スケジュール・ネットワーク全体の余裕へ与える影響が大きいということがある。したがって、もし今回考案した新たな第3の手法による解析結果がそのような結果になっていけば、つまり、感度の降順に並べたときに、赤、青、黒の順になっていけば、本手法の正しさが最低限保証されたということになる。そして、(図32)より、第3の方法による感度解析結果は、赤、青、黒の順になっている。以上のことから、本方法は概ね正しいとわかる。

分析2 (計算精度と計算時間)

次に、更に細かい分析として、第3の方法の精度を評価する。これは、各方法による感度解析の結果の一致率で評価する。ここでの一致率とは、例えば、第3の方法の第1の方法との一致率であれば、第3の方法による結果の順序関係 (つまり、アクティビティの降順の順序関係) と第1の方法による結果の順序関係との一致率である。結果を表5に示す。ここで、一致率の分母は13個のアクティビティの全ての組み合わせで ${}_{13}C_2 = 78$ である。

以上のように、第3の方法による感度解析の結果は、第1の方法、及び、低次元故に精度の保証されている第2の方法による感度解析結果双方との一致率が高かった。このことから、第3の方法による結果の正しさは非常に確かなものと推定される。また、計算時間を表6に示す。

分析3 (第3の方法の計算量抑制の可能性の評価)

精度と計算量のトレードオフを評価する。第3の方法で検出される一般化可能な構造は全部で6個であり、分析2までは6個中6個使用した感度解析の結果を用いた。本実験では、更に、6個中5個、6個中4個、…のように、得られた検出構造の一部のみ使って感度解析した結果 (感度の降順のアクティビティの順序関係) も求めた。そして、最も精度の高い6個中6個使った場合の感度解析の結果との一致率を算出した。結果を表7に示す。なお、「6個中5個での一致率」とは、「検出構造6個中5個による感度解析の結果の6個中6個による感度解析の結果との一致率」の意味である。

表7からわかるように、本例の場合は、感度解析に使用する検出構造の数の影響はあるが、ごく僅かという結果が得られた。つまり、第3の方法は精度を保ったまま計算量を抑えることが可能な方法と考えられる。言い換えると、第3の方法の精度は検出構造の数に依存し難い可能性が考えられる。

7.5 適用例2 (JAPEX プロジェクト 24次元)

Activity 数 26

7.5で扱ったJAPEXプロジェクトのオリジナルのスケジュール・ネットワークを適用例とした実験結果を示す。次

元数は24次元となり、ベクトル空間上のスケジュール・ネットワークは、図33となる。オリジナルのアクティビティには作業パスの始まりのアクティビティが2つあるため、作業開始のアクティビティとして、仮のアクティビティIを行程日数0のアクティビティとして定めているが、次元として含めてはいない。

7.5.1 感度解析の準備

まず、プロジェクトのスケジュール・ネットワーク (図33) のアクティビティ間の順序関係をネットワーク構造で表し、各作業パスの長さの制約 (納期制約) をベクトル空間上のN次元正凸多面体領域 (N=24) として表すと、以下の通りとなった。

$$i + a + b + n + t + v + w + x + z < 4 \quad (56)$$

$$i + a + b + n + t + v + w + y + z < 4 \quad (57)$$

$$i + a + b + n + u + x + z < 29 \quad (58)$$

$$i + a + c + f + k + p + r + u + x + z < 5 \quad (59)$$

$$i + a + c + f + k + p + s + w + x + z < 5 \quad (60)$$

$$i + a + c + f + k + p + s + w + y + z < 5 \quad (61)$$

$$i + a + c + f + l + s + w + x + z < 3 \quad (62)$$

$$i + a + c + f + l + s + w + y + z < 3 \quad (63)$$

$$i + a + c + g + m + u + x + z < 9 \quad (64)$$

$$i + a + c + g + n + u + x + z < 31 \quad (65)$$

$$i + a + c + g + n + t + v + w + x + z < 6 \quad (66)$$

$$i + a + c + g + n + t + v + w + y + z < 6 \quad (67)$$

$$i + a + d + n + u + x + z < 32 \quad (68)$$

$$i + a + d + n + t + v + w + x + z < 7 \quad (69)$$

$$i + a + d + n + t + v + w + y + z < 7 \quad (70)$$

$$i + a + d + h + v + w + x + z < 5 \quad (71)$$

$$i + a + d + h + v + w + y + z < 5 \quad (72)$$

$$i + a + e + n + u + x + z < 28 \quad (73)$$

$$i + a + e + n + t + v + w + x + z < 3 \quad (74)$$

$$i + a + e + n + t + v + w + y + z < 3 \quad (75)$$

$$i + a + e + o + y + z < 12 \quad (76)$$

$$i + j + p + r + u + x + z < 4 \quad (77)$$

$$i + j + p + s + w + x + z < 4 \quad (78)$$

$$i + j + p + s + w + y + z < 4 \quad (79)$$

$i, a, b, c, d, e, f, g, h, j, k, l, m, n, o, p, r, st, u, v, w, x, y, z$

は、順に、アクティビティ I, A, B, C, D, E, F, G, H, J, K, L, M, N, O, P, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z の余裕パラメータを表す。

7.5.2 感度解析と結果

次に、遅延リスク評価のための第1の方法 (格子点数による評価方法)、第2の方法 (N次元正凸多面体に内接する最大の単体の体積に基づく評価方法)、及び、第3の方法 (検出構造の大きさに基づく評価方法) により、感度解析を行った。今回のスケジュール・ネットワークでは、次元数が大きく、格子点計算に膨大な時間がかかってしまうため、第1の方法の格子点刻み幅を2にして計算を行った。

表 5. 電力設備の解体修理点検プロジェクトの方法ごとの一致率

第 3 の方法と第 1 の方法 (格子幅 1、工程日数 1/10)	77/78	98 %
第 3 の方法と第 2 の方法	74/78	94 %
第 1 の方法と第 2 の方法 (参考)	73/78	93 %

表 6. 電力設備の解体修理点検プロジェクトの方法ごとの計算時間

第 1 の方法	846 秒
第 2 の方法	各アクティビティ 1 秒以下 合計 13 秒以下
第 3 の方法	7.8 秒

表 7. 電力設備の解体修理点検プロジェクトの使用構造数ごとの一致率

6 個中 5 個での一致率 (平均)	97.86 %
6 個中 4 個での一致率 (平均)	95.56 %
6 個中 3 個での一致率 (平均)	94.74 %
6 個中 2 個での一致率 (平均)	94.70 %
6 個中 1 個での一致率 (平均)	95.30 %

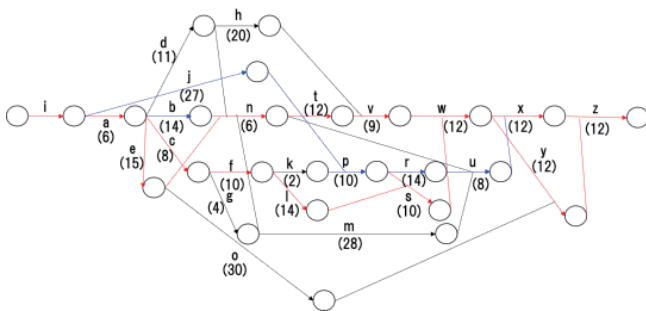


図 33. オリジナル JAPEX プロジェクト (24 次元) のスケジュール・ネットワーク

格子点数 : z>x>y>w>a>p>j>v>n>t>u>r>b>s>c>g>e>o>f>l>d>h>k>m
 単体積 : z>x>w>y>a>v>s>c>n>t>f>e>l>u>p>r>j>d>h>g>b>k>m>o
 提案手法 : z>x>a>y>w>v>s>c>n>t>f>l>e>u>p>r>j>d>h>b>g>k>m>o

図 34. オリジナル JAPEX プロジェクト (24 次元) の感度解析結果

感度解析の結果を (図 34) に示す。上から、第 1 の方法 (格子幅 2 日)、第 2 の方法 (24 次元単体)、第 3 の方法 (検出構造 17 個中 17 個使用) による結果を表している。即ち、アクティビティ 1 日遅延当たりの遅延リスク耐性 (24 次元正凸多面体) の縮退率の降順に、結果を表示している。(結果は余裕パラメータベクトルのアルファベットで表示している。) つまり、遅延の影響がスケジュール・ネットワーク全体の余裕へ与える影響が大きいアクティビティから順に (降順に) 表示しているということである。各セグメントの色の意味は、大きく 3 つに分けて説明すると、赤は本例の全てのクリティカルパス (制約条件式 (62)、(63)、(75) に対応付けられるパス) 上に乗るアクティビティ、青は準クリティカルパス (制約条件式 (56)、(57)、(77)、(78)、(79) に対応付けられるパス) に乗る

表 8. オリジナル JAPEX プロジェクト (24 次元) の方法ごとの一致率

第 3 の方法と第 1 の方法 (格子幅 2)	221/276	80 %
第 3 の方法と第 2 の方法	271/276	98 %
第 1 の方法と第 2 の方法 (参考)	223/276	81 %

アクティビティ、黒はクリティカルパスに乗らないアクティビティ (の余裕パラメータ) を意味する。

分析 1 (クリティカル性)

以上にに基づき、まず、新たに考案した第 3 の方法が概ね正しいかどうかをチェックする。先行研究までで既にわかっている知見として、クリティカル性の高いパスによりたくさん乗るアクティビティの遅延ほど遅延リスク耐性へ与える影響が大きい (N 次元正凸多面体の縮退率が大きい) という事、つまり、スケジュール・ネットワーク全体の余裕へ与える影響が大きいということがある。したがって、もし今回考案した新たな第 3 の手法による解析結果がそのような結果になっていけば、つまり、感度の降順に並べたときに、赤、青、黒の順になっていけば、本手法の正しさが最低限保証されたということになる。そして、(図 34) より、第 3 の方法による感度解析結果は、赤、青、黒の順になっている。以上のことから、本方法は概ね正しいとわかる。

分析 2 (計算精度と計算時間)

次に、更に細かい分析として、第 3 の方法の精度を評価する。これは、各方法による感度解析の結果の一致率で評価する。ここで的一致率とは、例えば、第 3 の方法の第 1 の方法との一致率であれば、第 3 の方法による結果の順序関係 (つまり、アクティビティの降順の順序関係) と第 1 の方法による結果の順序関係との一致率である。結果を表 8 に示す。ここで、一致率の分母は、アクティビティ I を除いた 24 個のアクティビティの全ての組み合わせで ${}_{24}C_2 = 276$ である。

以上のように、第 3 の方法による感度解析の結果は、格子幅 2 の第 1 の方法との一致率は低く、第 2 の方法による感度解析結果との一致率が高かった。また、第 1 の方法と第 2 の方法との一致率も低く、24 次元では第 2 の方法の精度も著しく悪くなることは考えづらいため、第 1 の方法の格子点幅が大きく、第 1 の方法の精度が低かったのではないかと考えられる。よって、第 2 の方法による感度解析結果との一致率が高い、第 3 の方法による結果の正しさは確かなものではないかと推定される。また、計算時間を表 9 に示す。

分析 3 (第 3 の方法の計算量抑制の可能性の評価)

精度と計算量のトレードオフを評価する。第 3 の方法で検出される一般化可能な構造は全部で 17 個であり、分析 2 までは 17 個中 17 個使用した感度解析の結果を用いた。本実験で

表 9. オリジナル JAPEX プロジェクト (24 次元) の方法ごとの計算時間

第 1 の方法	約 30 時間
第 2 の方法	各アクティビティ 1 秒以下 合計 24 秒以下
第 3 の方法	426 秒

表 10. オリジナル JAPEX プロジェクト (24 次元) の使用構造数ごとの一致率

17 個中 16 個での一致率 (平均)	99.51 %
17 個中 15 個での一致率 (平均)	99.34 %
17 個中 14 個での一致率 (平均)	99.11 %
17 個中 13 個での一致率 (平均)	99.05 %
17 個中 12 個での一致率 (平均)	98.77 %
17 個中 11 個での一致率 (平均)	98.62 %
17 個中 10 個での一致率 (平均)	98.38 %
17 個中 9 個での一致率 (平均)	98.18 %
17 個中 8 個での一致率 (平均)	97.95 %
17 個中 7 個での一致率 (平均)	97.67 %
17 個中 6 個での一致率 (平均)	97.53 %
17 個中 5 個での一致率 (平均)	97.15 %
17 個中 4 個での一致率 (平均)	96.68 %
17 個中 3 個での一致率 (平均)	96.19 %
17 個中 2 個での一致率 (平均)	94.99 %
17 個中 1 個での一致率 (平均)	92.33 %

は、更に、17 個中 16 個、17 個中 15 個、… のように、得られた検出構造の一部のみ使って感度解析した結果 (感度の降順のアクティビティの順序関係) も求めた。そして、最も精度の高い 17 個中 17 個使った場合の感度解析の結果との一致率を算出した。結果を表 10 に示す。なお、「17 個中 16 個での一致率」とは、「検出構造 17 個中 16 個による感度解析の結果の 17 個中 17 個による感度解析の結果との一致率」の意味である。

表 10 からわかるように、本例の場合は、感度解析に使用する検出構造の数の影響はあるが、ごく僅かという結果が得られた。つまり、第 3 の方法は精度を保ったまま計算量を抑えることが可能な方法と考えられる。言い換えると、第 3 の方法の精度は検出構造の数に依存し難い可能性が考えられる。

7.6 実験の考察

図 35～37 に基づき、評価実験全体の考察をする。

- 図 35 各適用例の規模と特徴
- 図 36 各適用例の計算時間
- 図 37 各適用例の計算精度

いずれの図の結果も、計算量への影響の大きい次元をキーとし、次元の昇順としたため、電力設備の解体修理点検 (オーバーホール)、JAPEX-15 次元、JAPEX-24 次元 となっている。また、①、②、③ は、順に、第 1 の手法 (格子点数による評価方法)、第 2 の手法 (単体体積による評価方法)、第 3 の手法 (検出構造による評価方法) を意味する。

1. 提案手法 (第 3 の手法) の計算時間について図 35 が各適用例における計算時間をまとめたものである。ただ

し、第 1 の方法での格子幅の大きさは次のような経緯で異なる格子幅で計算することとなった。まず格子幅はある程度の精度の見込める 0.5 日で設定したところ、JAPEX - 15D はかろうじて 0.5 日幅でおおむね 90 時間で計算できた。しかし、あとの 2 例に関しては計算不能に陥った。そこで、更に 1 日幅で再計算したところ、電力設備 - 13D は約 14 分で計算終了した。しかし、JAPEX - 23D は再度計算不能となったため、更に 2 日幅で再々計算した結果、30 時間で計算できた。以上の結果から、今回の 3 例の第 1 の方法による計算量は、JAPEX-15D、電力設備 - 13D、JAPEX-23D の順に大きかったということがわかる。注目すべきは、電力設備 - 13D の方が、それより次元の大きい JAPEX - 15D より計算量が大きかった点であるが、これは、電力設備 - 13D の方の (遅延リスク耐性の N 次元正凸多面体を表す) 制約式の上限值 (右辺乗数) の方が総じて大きかったため、評価すべき格子点数が多かったということが考えられる。

2. 提案手法 (第 3 の手法) の計算精度について (第 1、第 2 の手法による結果との一致率より) 図 37 - “③ と ①” の行は第 3 の手法による感度解析結果が、第 1 の手法による結果とどれだけ一致したかを表す一致率である。同 “③ と ②” の行は第 3 の手法による感度解析結果が、第 2 の手法による結果とどれだけ一致したかを表す一致率である。なお、考察上の参考のため、“① と ②” の行に、① の結果と ② の結果の一致率も示した。まず、① の精度の良い JAPEX - 15D の結果からわかることは、③ による結果は、①、② の結果双方との一致率が高かった (順に 98 %、95 %) ことから、③ の計算精度は、ある程度信頼に値するということである。また、① の精度を若干落として実施した電力設備 - 13D の結果からも、③ による結果は、①、② の結果双方との一致率がおおむね高かった (98 %、94 %) とわかる。ところが、① の精度を更に落とした JAPEX - 23D の結果を見ると、③ による結果は ② の結果との一致率は前の 2 例同様に非常に高かったのに対し、① の結果との一致率は前の 2 例より顕著に低く 80 % であった。更に、この時の ① の結果は、② による解析結果との一致率も 81 % と低い。以上のことから、本例の場合、③ の結果の ① の結果との一致率が低かった理由は、第 3 の方法の計算精度の問題ではなく、荒い格子幅の下での第 1 の方法の計算精度の低さによるものと考えられる。なお、第 2 の方法は、次元の上昇による (遅延リスク耐性の) 指標化上の誤差が心配される方法であるが、本例では、第 3 の方法との一致率が極めて高かった (98 %)。以上、全く異なるアプローチをとる第 1 と第 2 の方法での計算結果がこのように一致したこと、また、精度の荒い第 1 の方法との一致率も同程度に低かったことから、本例においては、第 1、第 2 の方法による結果はともに信頼性が高かったと考えられる。

3. 第 3 の方法の計算量抑制の可能性について図 37 の「使

		作業数	次元	特徴
1	JAPEXプロジェクト	15	15	格子点数計算が精度 良くできる規模の上限
2	JAPEXプロジェクト	26	24	スケジュール・ネットワーク の次元が高い
3	電力設備の解体 修理点検プロジェクト	150	13	作業数が極めて大きい

図 35. 各適用例の規模と特徴

	電力設備-13D Activity 150	JAPEX-15D Activity 15	JAPEX-24D Activity 26
①	14分	90時間	30時間
②	13秒未満	15秒未満	24秒未満
③	8秒	16秒	7分
①の 格子幅	1.0	0.5	2.0
	格子幅0.5 で計算不能		格子幅1で 計算不能

図 36. 各適用例の計算時間

用する検出構造数と一致率との相関関係」の各列には、それぞれの例題に関する、評価結果が示されている。図の見方、意味を、JAPEX 15-Dの列で説明する。まずこの例の場合、検出構造が全部で7つあった。そして、第2、第3の方法との一致率は、その7つすべてを使って感度解析を行った結果との一致率であった(図中X)。これに対し、ここで評価したかったことは、7つすべてを使った感度解析の結果と、7個中6個、7個中5個、7個中4個、…のように、数を減らして感度解析したときに、その結果の精度がどのように落ちていくのかということであった。ただし、図37では、各々の平均値のみ記してある。つまり、例えばJAPEX 15-Dの「4/7 98.94%」は、「7個中4個の検出構造で感度解析を行った結果の7個中7個で感度解析を行った結果との一致率が98.4% (平均)」ということを意味する。

以上の図の見方、意味を踏まえた考察が以下のとおりである。

- いずれの適用例においても、感度解析に用いる検出構造の数と計算精度との間に相関関係はあった。
- しかし、その精度の落ち方は、予想していたよりも小さかった。このことから、本方法で原理的に実現し得る精度を示すうえで、必ずしも全ての検出構造を使用しなくても問題ないと考えられる。
- このことは、今後、より大規模な問題を扱う場合の計算量抑制の可能性を示唆している。
- ただし、電力設備-13Dの結果を見ると、6構造中2個での解析結果と、6構造中1個での解析結果の精度の平均が逆転していることから、より良い精度を示し得る構造の特徴について検討する必要があると考えられる。

8. まとめ

本研究室では、近年のプロジェクトの大規模複雑化やプロジェクトを取り巻く環境の変化に伴い深刻化している「遅延

	電力設備-13D Activity 150	JAPEX-15D Activity 15	JAPEX-24D Activity 26	
③と①	98%	98%	80%	X
③と②	94%	95%	98%	
①と②	93%	99%	81%	
①の 格子幅	1.0	0.5	2.0	
	格子幅0.5 で計算不能		格子幅1で 計算不能	
使 用 す る 検 出 構 造 数	5/6 97.86%	6/7 99.57%	16/17 99.50%	Y
	4/6 95.55%	5/7 99.19%	15/17 99.33%	
	3/6 94.74%	4/7 98.94%	14/17 99.10%	
	2/6 94.70%	3/7 98.91%	13/17 99.04%	
	1/6 95.29%	2/7 97.66%	12/17 98.77%	
		1/7 96.57%	11/17 98.61%	
	検出構造 は都合6種	検出構造 は都合7種	10/17 98.37%	
			9/17 98.18%	
			8/17 97.94%	
			7/17 97.67%	
一 致 率			6/17 97.52%	
			5/17 97.15%	
			4/17 96.67%	
			3/17 96.19%	
の 相 関 関 係			2/17 94.98%	
			1/17 92.33%	
			検出構造 は都合17種	

図 37. 各適用例の計算精度

リスク」の問題に着目し、遅延リスクを考慮したスケジュール管理をサポートするためのシステム、手法の開発を目的とし、具体的には従来のような、コスト、リソース、時間の3要素に遅延リスクを加えた4要素のトレードオフ・バランスを考え、スケジュール管理できるようなシステム、手法の開発を目指している。本稿では、その開発実現を助ける一問題解決方法を示した。先行研究では、プロジェクトにおけるアクティビティ間の論理的順序関係と、各アクティビティそれぞれの所要時間とに基づいて、時間、原価及び資源の制約条件を満たすスケジュール・ネットワークは寄与とし、そのスケジュール・ネットワークから、各アクティビティそれぞれに許容される余裕時間を示す余裕パラメータを要素とするベクトル空間において、アクティビティ間の独立従属関係に基づいて、スケジュール・ネットワークを簡略化すると、スケジュール・ネットワークの全体期間(納期)に対する「余裕」(遅延リスク耐性)を表すN次元正凸多面体の領域が得られ、その領域の大きさ又はその大きさの(アクティビティの)遅延に対する感度を指標値としてスケジュール・ネットワークを評価する手法が提案されていた。しかし、遅延リスク耐性のN次元正凸多面体の領域の大きさを算出する方法に問題があった。具体的には、第1の方法(格子点数による評価)には計算量の問題が、第2の方法(N次元正凸多面体に内接する最大の単体の体積に基づく評価)には高次元での精度を保証し難いという問題があった。そこで本稿では方法1より計算量が少なく方法2より高次元での計算精度の保証がし易い新たな計算方法(第3の方法)を示した。第3の方法は、N次元正凸

多面体から、例えば余裕パラメータを積分変数、被積分変数として用いる積分計算、すなわち体積計算の一般化が可能な構造を抽出し、抽出された構造の大きさ又は工程の遅延に対する感度(変化量)を指標値とする方法である。しかし、第3の方法は、グラフ理論をベースとした仮説であり、その正しさは図的表現が可能な3次元までの簡単な例で確かめられているに過ぎなかった。したがって、本稿では、その正しさと、性能(計算時間と計算精度)を実験的に明らかにした。本稿で行ったことを以下に列挙する。

1. 新たな第3の手法で遅延リスク評価をするための感度解析の手順(即ち、アクティビティの遅延の感度を指標化する手順)の開発及び自動化
2. 適用例を用いた評価実験に基づく、第3の方法の性能評価実験
 - 1) 計算時間と計算精度の評価
 - 2) 計算量抑制の可能性を見極めるための評価

なお、今回使用した適用例は以下の通りであった。

- 中規模ガス処理プラント建設プロジェクト(JAPEXプロジェクト)
 - － 「15次元、Activity数15」のケース
 - － 「24次元、Activity数26」のケース
- 電力設備の解体修理点検プロジェクト(13次元、Activity数150程度)

参考文献

- 1) 佐藤 知一：プロジェクトにおけるスケジュールと費用のトレードオフを考える、スケジュール学会シンポジウム講演会論文集, pp.135-137, 2015.
- 2) 藤原 稔久, 諏訪 晴彦, 森田 浩: 資源制約付きプロジェクト・スケジュール問題に関する基礎的研究, 数理解析研究所講究録, pp.125-130, 2009.
- 3) アード・バリュー・マネジメント (EVM) - Wikipedia
- 4) <https://www.innovationmanagement.co.jp/column/no17/>, (2019/01 閲覧)
- 5) 池田 将明：建設エンジニアのためのPMSによるプロジェクト計画入門, 2005.
- 6) 富田 旋, 高塚 佳代子, 門川 真樹, 佐藤 知一, 岡崎 直宣：プロジェクトのスケジュール・ネットワークの遅延リスク耐性の評価, 日本経営工学会秋季大会講演会論文集, pp.85-86, 2018.
- 7) 富田 旋, 高塚 佳代子, 門川 真樹, 佐藤 知一, 岡崎 直宣：スケジュール・フロートのベクトル空間表現に基づく意思決定モデル, システム・情報部門学術講演会2017講演会論文集, pp.145-146.
- 8) R.J. ウィルソン著, 斎藤 伸自, 西関 隆夫 訳: グラフ理論入門, 近代科学社.
- 9) Fernando Acebes, Javier Pajares, Jose Manuel Galan b, Adolfo Lopez-Paredes: A new approach for project control under uncertainty. Going back to the basics, International Journal of Project Management, pp423-434, 2014.
- 10) Nobuaki Ishii, Yuichi Takano, and Masaaki Muraki: An order acceptance strategy under limited engineering man-hours for cost estimation in Engineering-Procurement-Construction projects, International Journal of Project Management 32, pp519-528, 2014.
- 11) Taketoshi Yokemura and Masahiro Inoue: A Method to Solve PBL Issues and to Improve Project Management Competencies of Students, Management Studies, May-June, Vol.6, pp147-166, 2018.
- 12) Timo Ala-Risku and Mikko Karkkainen: Material delivery problems in construction projects, A possible solution, Int. J. Production Economics 104, pp19-29, 2006.
- 13) 韓 鳳天: 水力発電設備の定期修理管理プロジェクトへの適用による工程管理システムの評価, 宮崎大学修士学位論文, 2016.
- 14) 富田 旋: 時間とコストの一元管理のためのプロジェクト管理システムの大規模プロジェクトへの適用に関する検討, 宮崎大学学士学位論文, 2017.
- 15) 高塚 佳代子, 富田 旋, 高橋 尚己, 佐藤 知一, 岡崎 直宣: スケジュール・ネットワーク全体に分散するフロートの包括的評価, 化学工学会第84年会講演予稿集 I206, 2019.
- 16) 高塚 佳代子, 佐藤 知一, 山場 久昭, 油田 健太郎, 岡崎 直宣: スケジュールのロバスト性をフロートの解空間の大きさで評価する方法について, 化学工学会第49秋季大会, 2017.
- 17) クリティカルパス法 - Wikipedia
- 18) Hiroki Furuhashi, Kenji Araki, Taisuke Ogawa, Mitsuru Ikeda: Effect on Completion of Clinical Pathway for Improving Clinical Indicator, Cases of Hospital Stay, Mortality Rate, and Comprehensive-Volume Ratio, J Med Syst, p206, 2017.
- 19) 中島 直樹, 岡田 宏基, 合地 明: (総説) 病院情報システムとクリニカルパス, 日本医療情報学会春季学術大会, pp21-28, 2007.
- 20) Program Evaluation and Review Technique (PERT) - Wikipedia
- 21) 潮 俊光: マックス代数によるシステム理論の基礎, 数理解析研究所講究録 1020 巻, pp.165-179, 1997.
- 22) <http://brevis.exblog.jp/20000432/>, (2017/02 閲覧)
- 23) Stephen A. Devaux: The Drag Efficient, Defense AT&L, January-February, 2012.

- 24) <http://brevis.exblog.jp/20044525/>, (2017/02 閲覧)
- 25) Project Management Institute: プロジェクトマネジメント知識体系ガイド (PMBOK ガイド) 第6版, 2017.
- 26) <http://www.house-support.net/tisiki/mitumori.htm>, (2017/02 閲覧)
- 27) 門川 真樹: プロジェクトのスケジュール・ネットワークの遅延リスク耐性の評価について, 宮崎大学学士学位論文, 2018.
- 28) ピックの定理 - Wikipedia
- 29) http://www.geocities.jp/ikuro_kotaro/koramu/531_p1.htm, http://www.geocities.jp/ikuro_kotaro/koramu/532_p2.htm, (2018/01 閲覧)
- 30) シンプレックス法 - Wikipedia
- 31) <http://www7.atwiki.jp/neetubot/pub/neetbot-1.0.pdf>, (2018/01 閲覧)
- 32) <https://tech.nikkeibp.co.jp/dm/article/WORD/20131015/309062/?ST=msb>, (2018/09 閲覧)
- 33) https://www.meidensha.co.jp/products/maintenance/prod_01/prod_01_02/index.html, (2020/01 閲覧)