

プロジェクト・スケジュールの遅延リスクの分析手法

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

An Analysis Method of Project Schedule Delay Risks

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

Abstract

Project management, there is a problem that the delivery schedule and the cost are easily exceeded because only inflexible scheduling that cannot tolerate any delay can be performed. Such a problem, the so-called “delay risk” problem, is becoming more serious. For this reason, it is necessary to balance the trade-off of four factors including “process (time), resource, cost (cost)” and delay risk. Therefore, a rescheduling method in consideration of a delay risk has been proposed. However, if the number of activities increases, the amount of calculation for calculating the delay risk or the magnitude of “delay risk tolerance” having a negative correlation with the risk becomes enormous, and the accuracy of the calculation result also greatly decreases. Two methods for calculating the delay risk tolerance of the project schedule as the size of the N-dimensional convex polyhedron region were developed in previous research, but there were problems with the amount of calculation and accuracy. Therefore, in this paper, we introduced the “new third method” and performed its performance evaluation in more detail. It has been confirmed in a simple example that the third method can accurately calculate the magnitude of delay risk tolerance with a small amount of calculation. Therefore, the performance evaluation procedure was automated so that performance evaluation experiments using larger scale application examples could be performed, and experiments were performed using three practical application examples. As a result, in this application example, it was confirmed that the third method was a method capable of performing accurate calculations with a small amount of calculation.

Keywords: project management, critical path, delay risk, EVM, Maxima

1. はじめに

良いプロジェクト計画立案のためには、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。従来の管理手法では、工程（時間）は、図形式で描いたり、原価（コスト）は表計算ソフトで表にするといったように個別に管理されていた。このため、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は、人が経験と直感に基づいて行うしかなかった。この結果、工程は順調に進んでいるのに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などの問題が、プロジェクトの実際の状況を把握できないために発生していた¹⁾²⁾。しかし、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「アード・バリュー法」(EVM)³⁾⁴⁾が考案された1970年頃より、工程、資源、原価をバランスさせ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ない融通の利か

ないスケジュールリングしかできないため、簡単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が発生していた。そのような問題、いわゆる「遅延リスク」の問題が深刻化している。そのため、「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必要がある。そこで、遅延リスクを考慮したリスケジュールリングの方法が提案されている⁶⁾⁷⁾。しかしながら、アクティビティの数が増えれば、遅延リスク又はそれと負の相関のある“遅延リスク耐性”の大きさを計算する計算量が膨大となり、計算結果の精度も大きく低下する。そこで、本研究では、この計算量と精度の問題に対処するための一方法が提案されている。具体的には、体積計算が一般化可能な構造（“一般化可能な構造”或いは“検出構造”と呼ぶ）を1つ以上抽出し、その体積が各工程が1日遅延した際に、どの程度小さくなるか（縮退率）といった感度解析に基づく指標の提案がなされている。そこで本研究では、上記指標による遅延リスク評価の方法が、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ている。その中で、本卒研で行ったことは以下のとおりである。

1. 提案手法で検出された構造の積分計算の自動化
2. 適用例を用いた評価実験に基づく、提案手法の性能評価実験

具体的には、提案手法の計算時間と計算精度、および、計算量抑制の可能性を評価する。

^{a)}工学専攻機械・情報系コース大学院生

^{b)}情報システム工学科学部生

^{c)}教育研究支援技術センター技術専門職員

^{d)}情報システム工学科教授

^{e)}情報システム工学科助教

^{f)}情報システム工学科准教授

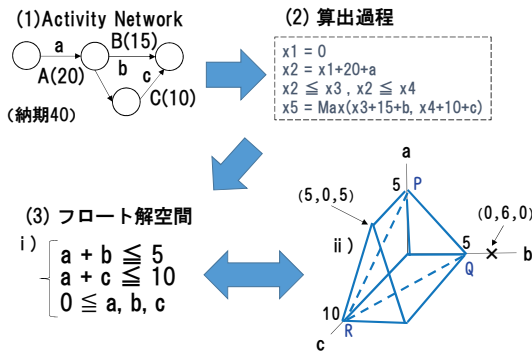


図 1. N次元凸多面体生成の流れ

2. 先行研究

2.1 “遅延リスク耐性”について

遅延リスクを直接定量化することは困難であるため、これと負の相関関係にあるプロジェクト・スケジュール全体の余裕の大きさを定量化する方法が先行研究で考案され、これを“遅延リスク耐性”と呼んでいる。具体的には、プロジェクトがスケジュール・ネットワークで表されるとき、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)、納期制約をパラメータベクトルの存在可能領域として表すと、その領域は N 次元凸多面体を成すが、それがプロジェクト・スケジュールの全体余裕を表す遅延リスク耐性の実態となる。例を示す。図 1-(1)のように、Activity A, B, C があり、期間がそれぞれ 20 日、15 日、10 日とする。A と B、A と C は順序関係があり、B と C は並行関係にある。() 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、グラフ形式のスケジュール・ネットワーク (Activity Network と同義) が所定の計算過程を経て (図 1-(2))、ベクトル空間表現 (図 1-(3)) に変換されると、遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体が得られる。

2.2 遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体の意味

N 次元凸多面体上の各点は、「プロジェクトの全体期間を変えない Activity レベルでの遅延パターン」に相当する。例えば、図 1-(3)-ii の凸多面体は、同図 1-(3)-i の図的表現であるが、その境界及び内部の点は全て「プロジェクトの全体期間を変えない Activity レベルでの遅延パターン」に対応付けられる。例えば、境界上の点 (5,0,5) であり、実際、Activity A と C が共に 5 日遅延してもプロジェクト全体期間は納期 40 日を逸脱しない。一方、本 N 次元凸多面体からはみ出ている点 (0,6,0) は「プロジェクトの全体期間を変えない Activity レベルでの遅延パターン」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、全体期間は納期 40 日を超過する。また、遅延リスク耐性を表す N 次元凸多面体の大きさは「全体期間を変えない遅延パターンの数」で概ね評価できる。このとき、この遅延パターンの数が、スケジュール・ネットワーク全体に分散する余裕の包括的な評価値となる。つまり N 次元凸多面体の大きさが“プロジェクト全体余裕の大きさ”ということである。

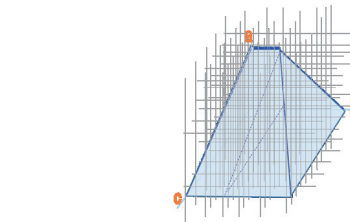


図 2. N次元凸多面体に整数格子を被せたイメージ

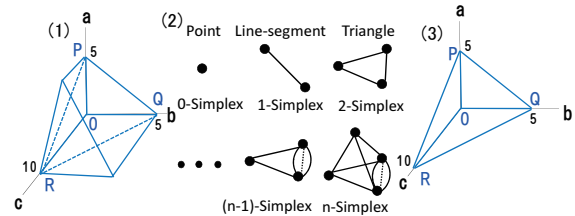


図 3. 単体体積による評価

2.3 N次元凸多面体の大きさの算出

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 (“Nd-CP” と記す) を成す。従って、スケジュール・ネットワークの全体余裕の大きさ評価のためには Nd-CP (1 ≤ N) の体積を求めればよい。しかし、N 次元凸多面体の大きさの体積計算は、高次元では一般化できない。そこで、体積計算のかわりに、N-次元空間内の格子を凸多面体に被せ (図 2)、格子点の数で評価する方法を導入した。

実際、15 次元のフロート解空間の分析において、15d-CP の格子点を格子刻み幅 1 日で数え上げた場合、最大で 16 時間程度かかった。現在、Activity 数が 1000 程度の実務レベルのプロジェクトへの適用を目指しているため、この方法は現実的ではない。そこで、高次元でも計算量が少なく済む「指標」を導入した。この指標としての要件は、大小関係の評価に限定すれば、ある程度の精度が見込めるものであることとし、その指標候補として Lp ノルムや原点-重心間の距離など試したが、そのなかで、群を抜いてよい結果を示したものが単体の超体積であった。具体的には、N 次元凸多面体に内接する最大の単体である。なお、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、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・・・のようになる (図 3-(2))。例えば図 1 の N 次元凸多面体 (図 3-(1)) の単体は図 3-(3) となる。このような単体は、高次元でも体積計算の一般化が可能で、計算量の問題はないが、精度に問題がある。

3. 遅延リスク耐性評価のための新たな手法

本方法は、スケジュール・ネットワーク全体の余裕 (遅延リスク耐性) を表す 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、システム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。

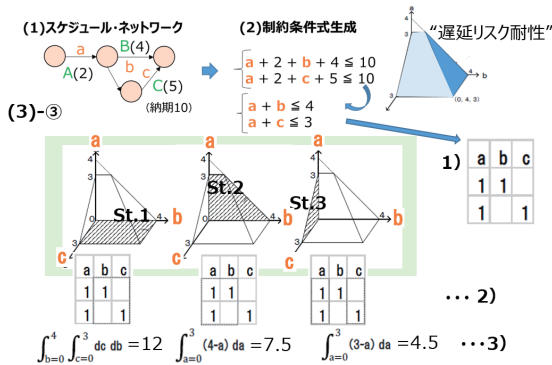


図 4. 提案手法

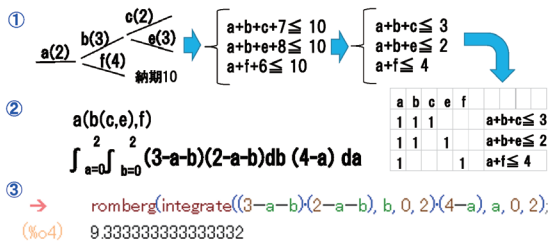


図 5. Maxima の使用例

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 4-(3)-③-1)。
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 4-(3)-③-2)。
3. 検出された構造の大きさを積分計算する (図 4-(3)-③-3)。

上記 3 の「検出された構造の積分計算」は数式処理システム Maxima⁸⁾で行った。Maxima とは、LISP で記述された数式処理システムで、GNU(GNU's Not Unix!) と GPL(General Public License) に基づくフリーソフトウェアである。コマンド処理やバッチ処理によるプログラムが可能で、使用例としては、加減乗除、多項式展開、因数分解、方程式、微分、積分、総和、総積などある。Maxima による積分のプログラム方法を図 5 を使って説明する。まず、図 5-① のようにネットワーク構造をベクトル空間表現し、その制約条件式から 1/0 行列を生成する。そして、本方法の手順で説明したような条件の構造を抽出する。次に、図 5-② のようにその構造の積分関数と被積分関数の関係を簡易的に表し、それによって積分式を生成する。最後に、図 5-③ のように生成した積分式を Maxima を使って計算する。この際のプログラム方法は、integrate(関数, 変数, 開始値, 終了値); であり、解を小数表示する場合は、integrate ⇒ romberg とする。

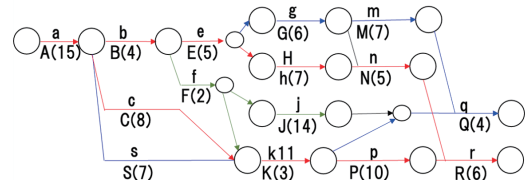
4. 評価実験

4.1 実験目的

実験目的は、遅延リスク耐性の大きさを評価するための新たな計算方法 (3. 章) の性能評価である。評価方法は、先行研

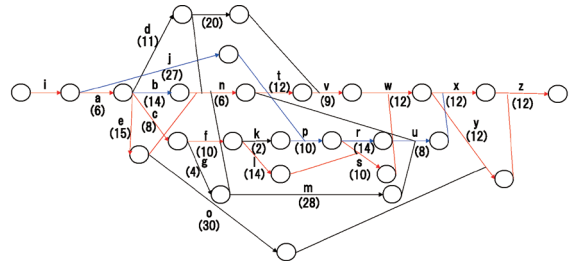
	作業数	次元	特徴		
1	JAPEXプロジェクト	15	15	格子点数計算が精度良くできる規模の上限	(図6)
2	JAPEXプロジェクト	26	24	スケジュール・ネットワークの次元が高い	(図7)
3	電力設備の解体修理点検プロジェクト	150	13	作業数が極めて大きい	(図8)

表 1. 各適用例の規模と特徴



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 6. 15 次元のスケジュール・ネットワークと結果



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 7. 24 次元のスケジュール・ネットワークと結果

究と同様の感度解析とし、評価項目は、以下の通りとする。

1. 計算時間と計算精度
2. 計算量抑制の可能性

適用例は、表 1 に示す 3 つであり、いずれも現実のプロジェクト・スケジュールを基に作成されたスケジュール・ネットワークを使用している⁹⁾¹⁰⁾。ここで、JAPEX というのは、中規模ガス処理プラント建設プロジェクトの略称であり、テスト用に作成した 15 次元版 (図 6) と、オリジナルの 24 次元版 (図 7) を使用した。各々の作業数、スケジュール・ネットワークの次元、特徴は表 1 に示したとおりである。各適用例のスケジュール・ネットワークを図 6~図 8 に示す。表記方法は基本的に図 1 のネットワーク図と同じである。ただし、赤いパスは初期段階でのクリティカルパス (最長作業経路)、青いパスは準クリティカルパスを表す。

4.2 実験方法

性能評価のための感度解析では、まず、作業の遅延がプロジェクト・スケジュール全体の余裕に及ぼす影響 (感度) の大きさを、評価対象の新たな手法を使って作業ごとに算出し、感度の大きい順に作業名を列挙する。この感度の順序関係が感度解析の結果であり、この順序関係の正しさが当該手法の精度となる。そして、今回、この感度解析の結果 (順序関係) の正しさ、つまり計算精度は、次の 2 種類の方法で評価することとした。まず、一つは、スケジュール・ネットワークの構造的特徴に基づき、評価する。具体的には、遅延に対する感

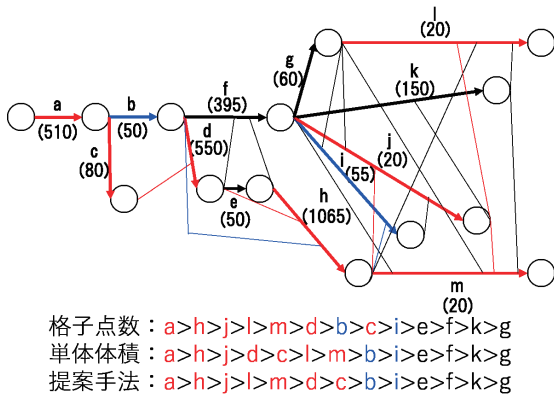


図 8. 13 次元のスケジュール・ネットワークと結果

	1	2	3		1	2	3
	電力設備-13D 作業数 150	JAPEX-15D 作業数 15	JAPEX-24D 作業数 26		電力設備-13D 作業数 150	JAPEX-15D 作業数 15	JAPEX-24D 作業数 26
第1 (格子幅)	14分 1.0	90時間 0.5	30時間 2.0	第3と1	98%	98%	80%
第2	13秒未満	15秒未満	24秒未満	第3と2	94%	95%	98%
第3	8秒	16秒	7分	格子幅	1.0	0.5	2.0

表 2. 計算時間と計算精度の結果

	1	2	3	
	電力設備-13D 作業数 150	JAPEX-15D 作業数 15	JAPEX-24D 作業数 26	
	5/6 97.86%	6/7 99.57%	16/17 99.50%	7/17 97.67%
	4/6 95.55%	5/7 99.19%	15/17 99.33%	6/17 97.52%
	3/6 94.74%	4/7 98.94%	14/17 99.10%	5/17 97.15%
	2/6 94.70%	3/7 98.91%	13/17 99.04%	4/17 96.67%
	1/6 95.29%	2/7 97.66%	12/17 98.77%	3/17 96.19%
		1/7 96.57%	11/17 98.61%	2/17 94.98%
検出構造数			10/17 98.37%	1/17 92.33%
は都合6種		検出構造数	9/17 98.18%	検出構造数
		は都合7種	8/17 97.94%	は都合17種

表 3. 計算量抑制の可能性の結果

度は、クリティカル性の高い作業、つまり、所要時間の長い作業パスに、より多く乗っている作業の遅延ほど大きいことが、先行研究での知見よりわかっている。そのため、この構造的特徴から推察される感度の大小関係が、提案方法による感度解析の結果と大きく矛盾しないかどうかを確認する。もう一つは、既存の第1(格子点数)、第2(単体体積指標)の方法での感度解析の結果(つまり感度の順序関係)と第3の方法(提案手法)の感度解析の結果の一致率で評価する。計算量抑制の可能性の評価では、感度解析に使用する検出構造の数を減らした場合と全て使用した場合を比較してどのぐらい精度が落ちていくのかを、それぞれの一致率で評価することとした。以下、3つの適用例を使用して実施した実験結果を示す。

4.3 実験結果

各適用例の感度解析の結果は、図6~図8のスケジュール・ネットワークの下に示す順序関係である。また、計算時間と計算精度の結果は表2に示す。さらに、新たな方法の計算量抑制の可能性についての結果を表3に示す。

4.4 実験の考察

以下、格子点数で評価する方法を第1の方法、単体体積による方法を第2の方法、評価対象の新たな手法を第3の方法と記し、実験結果の考察をする。まず、精度評価するのに最

も都合の良い適用例1(JAPEX15次元)の結果から考察する。今回の評価対象である第3の方法による計算時間はわずか16秒だったのに対し、精度の高い(格子幅の密な)第1の方法だと90時間かかった。しかし、得られる計算結果(感度の順序関係)の一致率は98%と、ほぼ一致した。次に、次元が高いために計算量の大きくなる適用例3の結果を見ると、第1の方法では格子幅を2まで粗くしないと計算できず、それでも30時間かかった。それに対し、第3の方法での計算時間は7分であった。さらに、その一致率だが、粗い格子幅での第1の方法との一致率は80%と低かったが、第2の方法との一致率は非常に高かった。なお、この時の第1の方法による結果は第2の方法による結果との一致率も81%と低かったことから、第3の方法の信頼性が示唆される。以上、その他の結果も併せ、総合的に判断した結果、着目する第3の方法は、精度の高い(格子幅の密な)第1の方法と同等の精度の計算結果を得ることができ、なおかつ第1の方法より極めて速い計算時間で求められる方法ということが、可能性として考えられる。さらに、第3の方法による感度解析で、使用する検出構造の数を減らすと全部使用した場合と比べてどのぐらい精度が落ちていくのかを、最も検出構造が多かったJAPEX-24Dの結果に着目し考察する。表3の見方だが、「16/17 99.50%」の意味は、「検出構造17個全部使って感度解析した結果と、そのうち16個だけ使って感度解析した結果との間の一致率の平均は、99.5%」という意味である。これに対し、17個中1個だけでの解析結果との一致率の平均も90%以上となった。つまり、使用する検出構造の数を減らしてもさほど精度は落ちないことが分かった。他の例でも同様だった。以上より、本方法は、計算精度を保ったまま計算量を抑えられる可能性のある手法であるとわかった。

5. まとめ

プロジェクト・スケジュールの全体余裕を表す遅延リスク耐性をN次元凸多面体の領域の大きさとして算出する方法が先行研究で2種類開発されたが、計算量と精度の問題があった。そこで、本稿では、遅延リスク耐性の大きさを少ない計算量で精度よく算出できる可能性が、高々3次元までの簡単な例では確かめられていた「新たな第3の手法」を導入し、その性能評価をより詳細に実施した。具体的には、より大きな次元、規模の適用例を使った性能評価実験ができるように、性能評価のための感度解析の手順を自動化し、3つの実用的な適用例を使用し、性能評価実験を行った。その結果、今回の適用例においては、第3の方法は少ない計算量で精度よく計算できる手法であることが確認された。

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，スケジューリング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・スケジューリング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) アーンド・バリュー・マネジメント (EVM) - Wikipedia
- 4) <https://www.innovationmanagement.co.jp/column/no17/>, (2020/01 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：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.
- 7) 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.
- 8) Maxima - Wikipedia
- 9) <https://tech.nikkeibp.co.jp/dm/article/WORD/20131015/309062/?ST=msb>, (2020/01 閲覧)
- 10) https://www.meidensha.co.jp/products/maintenance/prod_01/prod_01_02/index.html, (2020/01 閲覧)