

不完全情報下における長期・大規模プロジェクトの計画管理方法 Handling Long-term and Large-scale Project Plan under Incomplete Information

笠原 孝保[†] 関 洋[†] 上野 克宣[†]
Takayasu Kasahara Hiroshi Seki Katsunori Ueno
吉村 祐哉[‡] 長井 隆浩[†]
Yuuya Yoshimura Takahiro Nagai

1. はじめに

計画問題を数値最適化によって解く場合、入口の定式化のところで、現実とのすり合わせに苦労することが多い。例えば、どんな計画が良い計画であるかが不明確であるために目的関数を決められない場合がある。また、現場の状況の把握が不十分で制約条件の設定が不完全な場合もある。さらに、計画の進捗にしたがって、環境が変わるため計画に用いる定数が変わっていく場合もある。本研究では、このような不完全情報下における長期大規模プロジェクトの計画管理方法のひとつとして、多様な解を生成する手法の実現性を検討した。

2. 対象とする問題の定義

図 1 に、ここで対象とする計画問題の概要を図示する。ここで対象とするのは、ジョブショップスケジューリング問題としてモデル化される問題のうち、各工程間に任意の順序関係が設定されている一般ジョブ[1]と呼ばれるもので、かつ、各機械の処理能力に差がある一様並列機械を扱う問題である。このように限定したのは、計画問題には多くのバリエーションがあるため、議論を明確にするためである。ここで言う機械は、工程に利用するリソースを一般化したもので、能力の異なる複数の作業チームが任意の順序に設定された工程を実行するための計画や、能力の異なる複数のロボットを用いる工程のような問題を一般ジョブ・一様並列機械問題として定式化する事ができる。

ここで扱う問題は、一般ジョブ・一様並列機械問題に追加の制約条件として、工程が実行される環境に関わる制約条件を追加したものである。工程が実行される環境に関わる制約条件としては、温度、空間配置、空間放射線量、地盤の軟弱度などを想定している。そして、これらの環境条件とその環境での工程所要時間に対応して、機械の損耗が発生・蓄積し、一定の限界値を超える前に一定の期間を要するメンテナンス工程が追加で必要になるとする制約条件を追加する。

対象とする計画問題では各工程が実行される場所での環境は、あらかじめ概ねわかっているが、正確なところは、その工程の直前に実施する工程が完了するまではわからないとする。この様な状況は、例えば、トンネル工事で、掘り進まない地盤の硬さがわからないような場合や、ロボットで地中の放射性物質を回収・除去する場合に、空間線量率や作業効率に関わる残存構造物の配置や地形が作業によって変わってしまう場合や、製造工程で実際に機械を動かさないと機械への損耗がわからない等、程度の差はあれ、現実にはつきまとう問題である。

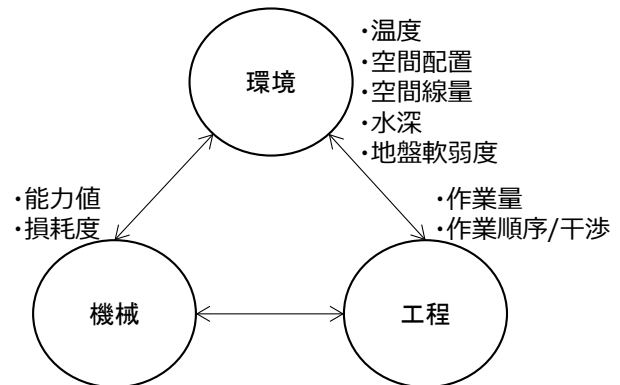


図 1 対象とする問題

さらに、以下の例のように環境と工程、機械は互いに影響を与える。

- (1) 工程→環境
工程を実行した結果、環境が変わる。例えば障害物を除去した結果、遮蔽構造物が減って、空間線量率が上がる。
- (2) 環境→機械
環境が変化した場合、機械の損耗が増える。
- (3) 機械→工程
機械の損耗の結果、機械のメンテナンス工程が追加される。

もともとの一般ジョブ・一様並列機械問題では、このような不明な情報や相互の依存関係の影響がなく、全ての情報が完全にわかったと仮定した上で数値計画法により単一の最適化を求解する。

しかし、不完全情報下における長期・大規模プロジェクトにおいては、情報の不完全性と、工程、環境、および機械の相互影響のために当初の計画を変更せずに実行していく事は困難で、計画の調整がたびたび行われると考えられる。このため、計画の調整のタイミングで、より良い意思決定をするための手法があれば、有用である。

3. 開発手法

不完全情報下における、長期・大規模プロジェクトにおいて、計画調整時における意思決定を支援するひとつの方法として、多様な解を生成するアプローチを試みた。不完全

[†](株)日立製作所 Hitachi, Ltd.

[‡]日立 GE ニュークリア・エナジー(株)

Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd.

情報下では、作業を進めるにつれて、計画のための情報量が増減したり、計画の前提となるデータが変わったりして、計画担当者は類似した経験の乏しい計画の調整を強いられると想定される。このような時、比較検討できる具体的な多様な案を生成して提示することは計画担当者の助けになると考えられる

このアプローチの例としては、整数計画法を用いて看護師のシフトスケジュールをする際に、適切な目的関数を設定する事が困難であるという問題意識を契機としたものがある[2]。看護師のシフトスケジュールの事例では、フィールドワークをもとに、重要なリソースを抽出し、そのリソースの割当に対して多様な計画案を提示することにより、厳密な評価関数を設定することなく、人が漠然ともっている良い解に近い案を選択できるようにしている[3]。

しかし、今回想定している長期・大規模プロジェクトは、これまで、実施されたことが無く、事例を集めることが不可能な問題である。

そこで、より良い意思決定を支援することができる別解とはどのようなものかを検討し、重要な機械の割当てが異なるものを別案であると仮定した。ここで、重要な機械は、初期の計画案が存在することを利用して、以下の観点から抽出する。

- ・機械が初期案のクリティカルパス(CP)工程に割り当てられる機械となっていること。
- ・CP工程に割り当てられた機械の中で当該工程に対する処理能力が中央値より高いこと。処理能力の高い機械をどの工程に割り当てるかは計画の違いの重要な指標と想定した。

図2に別案生成の処理フローを示す。このフローでは評価を簡単にするため以下のような工程に関わる前提条件(計画定義)を設定している。

[計画定義(工程条件)]

- ・工程 $A_s=\{1, \dots, A\}$ に各工程に対して、処理能力の異なる、 R 種類の能力別カテゴリをもつ機械 $R=\{1, \dots, R\}$ が割り当てられる。
- ・各工程の処理時間は、各工程の作業量を割り当てた機械の能力で割ったものである。
- ・能力別カテゴリごとに機械の上限値があり、この上限値を超えて同時に同じカテゴリの機械を割り当てられない。
- ・工程に割り当てられた機械は、工程ごとに設定された時間あたりの損耗度にしたがって、損耗を受ける。すべての機械に対して一定値の損耗度限界を設定する。

図2では、以下のように、変数を定義している。

- $x_{a,r}^{(0)}$: もとの解の工程 a への機械能力種別 r の割当数
- $y_{a,r}^{(n)}$, $n \geq 1$: 別案 n の工程 a への機械能力種別 r の割当数

上記の計画定義を設定した後、単一の最適計画(初期計画案)を求解し、初期計画案におけるCPを求め、CPに属する工程に割り当てられた機械のうち、能力の高いカテゴリを R^* とし、このカテゴリの機械のCPでの割当が異なる事を目的関数に追加するとともに、もとの解と異なる割当になることを制約条件に追加して、最適化処理を実行し、別案を生成する。これを順次繰り返すことにより、設定した N_a 個の別案を生成する。処理の仮定で、実行可能解が求め

られなくなれば、別案の個数が N_a 個にならなくても、その段階で別案の生成を中止する。

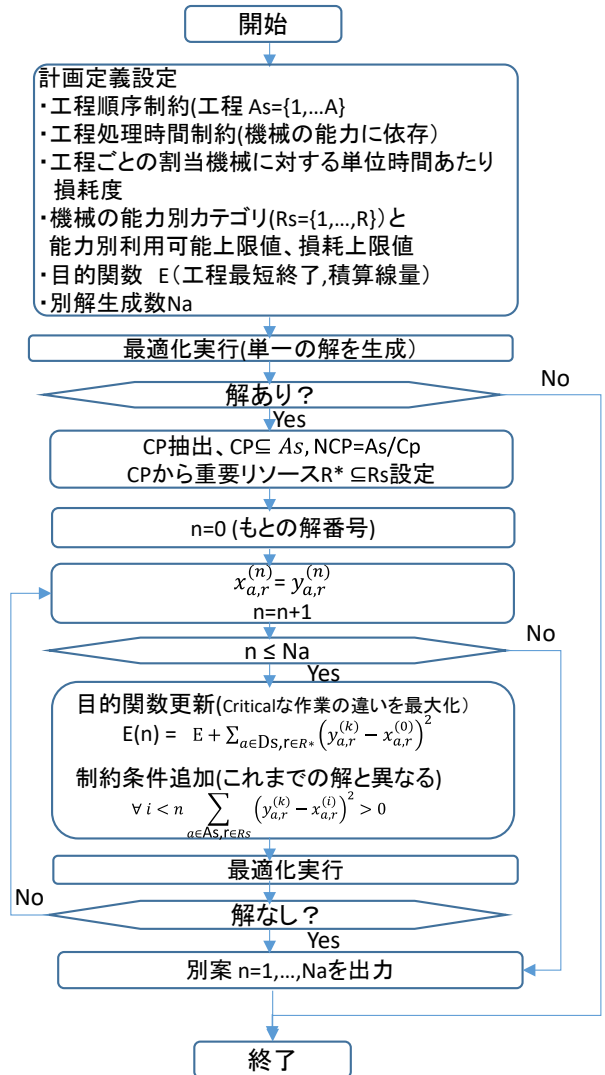


図2 別案生成処理概要

4. ケーススタディと結果

開発した手法の実現性確認のため、計画定義データを読み込んで、混合整数計画問題として自動定式化し、汎用最適化ソフトに読み込ませて結果を表示するプロトシステムを構築し評価を実施した。図3にプロトシステムの概要を示す。ソルバは、汎用最適化ソフトの Gurobi[4]を用いた。実行に用いた計算機環境を以下に示す。

- ・CPU: 12th Gen Intel(R) Core(TM) i7-12700 2.10 GHz
- ・RAM: 64.0GB
- ・OS: Windows 10 Professional

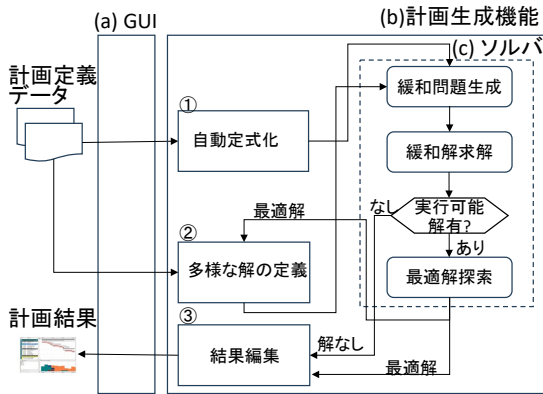


図 3 プロトシステム

4.1 評価ケース

G0 から G5 までの 6 つの工程を、一日 6 時間ずつの 4 シフト、24 時間作業で実行する計画を対象に、本手法を適用した。なお、本評価ケースでは、多様な計画を作成する手法の基本的な評価のため、メンテ工程、および、計画データが変更になった場合は含んでいない。評価ケースの各工程の作業量と、単位時間当たりの損耗量を表 1 に示す。作業量は、標準的な機械で完了するのに要する日数で定義した。各工程の順序制約を図 4 に FS (Finish Start) 関係を示す矢印等で示す。例えば、G2 工程は G1 工程が完了してから開始する。特殊な順序制約として、G5 は G3 が開始して 10 日以上後に実行されるとしている。G0 は、G1 から G5 までの工程が行われている間ずっと、実行される工程と設定したため、CP からは除外する。また、各工程において各シフトには能力の異なる”Machine_A”~”Machine_L”までの 12 個の機械から、1 つの機械を割り当てるとする。割り当てる機械は、簡単のため工程ごとシフトごとに同じものが用いられるとし、メンテナンスのため、一日 1 シフトのみしか割り当てられないとした。また、このほかに、各工程の実施時には工程の進捗には影響しないが、工程を監視する機械が 1 台必要で、監視する機械は、2 台しかなく、したがって、並行実施できる工程は 2 つまでとなるように計画データを設定した。監視するための機械以外の機械の処理能力は、”T_a”、”T_b”、”T_c”、”T_d”の 4 段階設定しており、これを表 2 に示す。”T_b”を能力の標準値 1 として、その相対値として、”T_a”の能力は、1.2 で最も高く、”T_c”は 0.8、”T_d”は 0.5 とした。能力が低い装置を工程に割り当てた場合は工程実行にかかる時間は長くなる。

表 1 工程データ

工程名	作業量	損耗量/hr
G0	60	1.0E-04
G1	20	1.0E-05
G2	70	1.0E-05
G3	70	1.0E-05
G4	15	1.0E-05
G5	32	1.0E-05

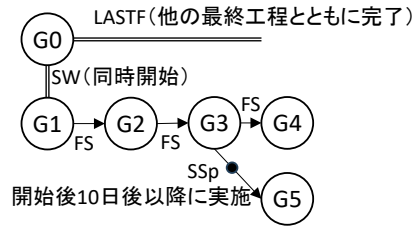


図 4 工程順序制約

表 2 機械データ

機械名	装置能力	処理能力相対値
Machine_A	Ta	1.2
Machine_B	Tb	1
Machine_C	Tc	0.8
Machine_D	Td	0.5
Machine_E	Ta	1.2
Machine_F	Tb	1
Machine_G	Tc	0.8
Machine_H	Td	0.5
Machine_I	Ta	1.2
Machine_J	Tb	1
Machine_K	Tc	0.8
Machine_L	Td	0.5

4.2 結果

図 5 に本手法を適用した結果をガントチャートで示す。一番上のガントチャートが初期計画案、下の 2 つが別案 1、別案 2 の計画案である。初期計画案では、G1~G5 の工程が CP となる。このとき、割りつけられる機械でもっとも処理能力の大きいカテゴリに属する重要な機械は、表 2 に示したように Machine_A、Machine_E、Machine_I の 3 つである。

表 3 に、各計画案における工程 (1 列目) の各シフト時間帯 (2 列目) に対する機械の割り当てを示す。割り当てられた重要な機械は、表の背景を暗く示している。別案 1、別案 2 のそれぞれについて、CP に属する G1~G5 の各工程に対する重要な機械の割り当て数が変わっているのがわかる。図 5 にみられるように最早終了という目的関数の観点からは、別案 1 と別案 2 は初期計画案よりは劣っているが、その原因は、表 3 に示した工程への機械の割り付けの違いによる。処理時間は、ターンアラウンド時間は全体で 1 時間程度であった。

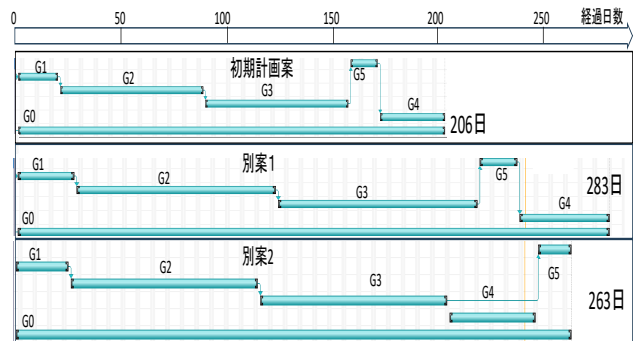


図 5 生成した計画案

表 3 機械の工程への割り付け

工程名	シフト番号	初期計画案	別案1	別案2
G0	1	Machine_B	Machine_A	Machine_A
	2	Machine_D	Machine_F	Machine_H
	3	Machine_H	Machine_I	Machine_I
	4	Machine_L	Machine_L	Machine_J
G1	1	Machine_A	Machine_B	Machine_B
	2	Machine_E	Machine_D	Machine_D
	3	Machine_I	Machine_G	Machine_E
	4	Machine_J	Machine_J	Machine_G
G2	1	Machine_A	Machine_B	Machine_B
	2	Machine_E	Machine_D	Machine_C
	3	Machine_F	Machine_G	Machine_E
	4	Machine_I	Machine_J	Machine_L
G3	1	Machine_A	Machine_B	Machine_B
	2	Machine_E	Machine_D	Machine_E
	3	Machine_F	Machine_G	Machine_K
	4	Machine_I	Machine_J	Machine_L
G4	1	Machine_C	Machine_B	Machine_C
	2	Machine_G	Machine_D	Machine_E
	3	Machine_J	Machine_G	Machine_F
	4	Machine_K	Machine_J	Machine_L
G5	1	Machine_A	Machine_B	Machine_B
	2	Machine_E	Machine_D	Machine_C
	3	Machine_I	Machine_G	Machine_D
	4	Machine_J	Machine_J	Machine_E

画担当者がこのような計画案を比較検討することにより、より良い案を案出する契機となりうる。

6. おわりに

不完全情報下における長期・大規模プロジェクトの支援を念頭に、多様な計画案を提示する手法を示した。本研究では、初期計画案をもとに、クリティカルパス上の工程に割りつけられる機械のうち、処理性能の高いものを重要な機械として設定し、重要な機械に対する工程への割り付けを変更して多様な計画案を提示する手法を検討した。

本手法を実現するプロトタイプシステムを構築し、6工程、12機械からなる約7か月の一般ジョブ・一様並列機械問題を例にその有効性を確認した。

参考文献

[1] 久保幹雄 他 編:” 応用数理計画ハンドブック”,朝倉書店 (2012).
 [2] 池上 敦子:” 問題解決における最適解”,オペレーションズリサーチ,vol.68(1),pp18-24 (2023).
 [3] 加藤 尚瑛ほか:” ナーススケジューリング問題における多様な解の生成”,情報処理学会論文誌 Vol.15(2),pp1-10 (2022)
 [4] Gurobi Optimization, LLC,” Gurobi Optimizer Reference Manual”, "https://www.gurobi.com" (2023).

図 6 に重要な機械に対する積算損耗を図示する。この例では、別案 1、2 において、損耗の大きな工程 G0 に Machine_A,I が割り当てられているため、この機械の積算損耗が大きくなる。このようなことを総合的に比較・検討して、最もよい案を選択するか、最適化における目的関数や制約条件の追加を行うことになる。

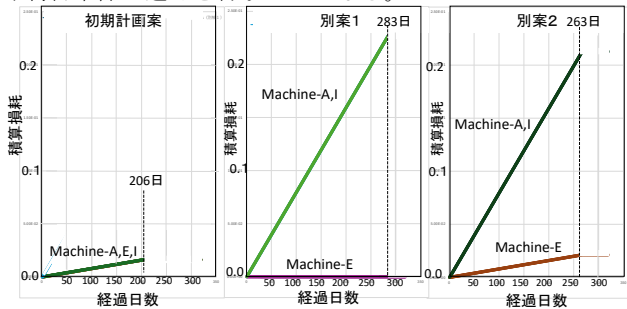


図 6 積算損耗

5. 本手法の有効性の検討

図 5 の結果を見ると、別案では設定した目的関数である最早終了という観点からは、劣った計画案ということになる。しかし、不完全情報下における長期・大規模プロジェクトの計画では、数理計画法の定式化に従った目的関数を正確に定義することが難しいことが多い。本ケーススタディの例でも、初期計画案では、重要な機械が G1、G2、G3、G5 の工程の各シフト時間に割りつけられている。このような場合、何かトラブルがあった時、急には重要な機械が割り当てられず、トラブル対応が困難になることも考えられる。これに対して、別案 1 では Machine_E がどの工程にも使われない機械となっており、何かトラブルあった場合に対応できる。この例は非常に簡単な場合ではあるが、計