

Original

A Simulation-Based Method for Capacity Adjustments in Job Shop Production Scheduling

Masahiro ARAKAWA¹, Masahiko FUYUKI¹, Hiroki NAKANISHI² and Ichiro INOUE³

Abstract

When tardy jobs are involved in a production schedule, an improved schedule is sought for to eliminate tardy jobs under the given available capacities. When the occurrence of a tardy job is judged to be inevitable, the reduction of tardy job is attempted by increasing resource capacities within the allowances granted by the upper-level planning department. However, it is generally difficult to decide the capacities when, to which machine and what amount, to add so as to minimize of the number of tardy jobs after suppressing the added amount of the capacity.

In this paper, a systematic simulation-based method for capacity adjustments is proposed which applies the Parameter Space Search Improvement method to the determination of additional capacities. Two parameters are introduced to span the parameter space. One parameter is used to control the total amount of adding capacities, and another parameter to control the distribution of capacities among resources. The best capacity adjustment plan is sought for on the parameter space.

In the proposed procedure, the resource utilization under the given (initial) planning condition is first investigated in order to setup the relationship between the parameters and the variables which decide the amount of capacity addition to each resource. As many production schedules as the possible combination of capacity adjustment plans are then generated by the simulation-based scheduling method, and incorporating the cutting off of redundant capacities, the capacity adjustment plan which gives the schedule with the minimum number of tardy jobs is selected as the best capacity adjustment plan.

The practical usefulness of the proposed method is demonstrated by using scheduling condition data on a practical large-scale system.

Key words: job shop, production scheduling, capacity adjustment, simulation

¹ Kansai University

² Graduate School of Kansai University

³ Kyoto Sangyo University

Received: April 28, 2000

Accepted: November, 10, 2000

ジョブショップ生産スケジューリングにおける シミュレーション法利用の能力調整法

荒川 雅裕¹, 冬木 正彦¹, 中西 弘樹², 井上一郎³

生産スケジューリング業務においてスケジュールに納期遅れジョブが発生した場合、計画担当者は現有の設備・工数内で遅れジョブを出さないようスケジュールの改善を試みるが、遅れジョブの発生が不可避と判断した場合には、工場の保有能力を上位の計画部署より認められた許容範囲内で追加し遅れジョブの削減に努める。しかしながら、最小の追加能力で納期遅れジョブ数を最小にするには、どの期間、どの設備に、どの程度の能力を追加すればよいかを決定することは難しい。ここではパラメータ空間探索改善法を能力追加を決定する問題に適用し、シミュレーション法に基づく系統的な能力調整法を提案する。さらに、現実の計画条件データを用いてその方法の有用性を示す。

キーワード：ジョブショップ、生産スケジューリング、能力調整、シミュレーション

1. はじめに

個別受注生産においては、客先との間で交わされた納期（客先納期）を順守することが最重要課題とされている。個別受注生産は通常ジョブショップ型の生産形態をとることが多く、ジョブごとに加工経路や加工時間、納期などが異なり、そのため必要とされる工数が、設備、時期によって異なり、一般に納期を順守できる生産の計画を策定することは容易でない。

生産の計画業務は通常、上位の生産計画業務と、そこで策定された生産計画に基づいて詳細な製造実施計画を策定する生産スケジューリング業務に分けられる。上位の生産計画で決められた基準日程計画と能力計画（負荷計画）は下位のスケジューリングの段階では変更しないのが計画業務の原則とされている。しかしながら、現実には、上位部署から許された範囲内の能力割り当ての変更や若干の能力追加によってスケジューリング段階で大きな改善が得られる場合が多いことから、スケジューリング業務レベルにおいて、業務担当者の経験と勘に基づいて能力の調整や追加が行われている。

このような理由から、生産スケジューリング段階で作成したスケジュール案に納期遅れジョブが発生する場合、業務担当者は以下に示す対策を段階的にとり、納期遅れジョブの解消に努める〔1〕。

- (a) まず、現有の設備・工数内で納期遅れジョブを出さないように、ジョブの作業順序の変更やロット分割などによりスケジュールの改善を行う。
- (b) 現有の設備・工数では納期遅れジョブの発生が不可避と判断した場合は、工場の保有能力を上位の計画部署より認められた許容範囲内で増加させ、納期遅れジョブの削減を試みる。具体的には残業や休日出勤の設定、他部門からの応援者の投入などにより工場の保有能力を増加させる。
- (c) 能力増加を行っても納期遅れとなるジョブに対しては、上位の計画部署へ特定工程の能力や納期遅れジョブの計画条件などの変更を要請する。

現実の計画問題を対象とした(a)に関する研究はこれまでに多数行われている〔2〕,〔3〕が、スケジューリングの問題として(b)の対策である能力調整に関する研究はほとんど見受けられない。

能力調整の前提となる負荷計画は、通常スケジューリングの上位に位置する生産計画の段階で作成される。生産計画段階の能力計画は、通常、計画対象期間が長く、工場全体を対象として週や月単位で能力と負荷のバランスを図ることから、計画精度は一般に粗く、また、きめ細かな能力の調整を行っても上位レベルでの生産計画に与える影響は小さいと考えられる。一方、スケジューリングの段階では、生産加工条件や操業カレンダー、代替機械の利用などを考慮して詳細なレベルでスケジュールを立案する。このレベルで能力をきめ細かく調整するとスケジュール結果に大きな

¹ 関西大学

² 関西大学大学院

³ 京都産業大学

受付：2000年4月28日，再受付（2回）

受理：2000年11月10日

影響を与え、スケジュール結果の質的向上が狙える。したがって、スケジュールリングのレベルでのきめ細かな調整はスケジュールリングに大きな意義を持つと考えられる。

これまでに能力計画/調整に関しては、生産計画段階での山積み・山崩しによる計画立案に関する研究が多くなされている〔4〕,〔5〕。また近年、生産計画と生産スケジュールの整合性をとり、質の高い能力調整やジョブ加工順序を設定することを目的として、生産計画の立案と生産スケジュールを統合する方法が提案されている〔6〕～〔9〕。このような方法の一部はシステム化され、市販されて現実の生産の場に導入されている〔10〕。しかしながら、このようなシステムにおいても能力調整は生産計画段階でのMRPベースによる山積み・山崩しによって行われているために、精度の粗い調整の範囲に留まっている。

詳細なスケジュールリングを扱った(b)に関連する研究には、ジョブの加工順序を考慮しながら、能力調整を行う方法として、例えば、ジョブごとに異なる着手時刻と納期が設定された条件下で、最大納期遅れ最小化〔11〕や納期厳守に関するコスト最小化〔12〕を目的として、残業などの稼働停止時間帯の変化を考慮するスケジュールリングが検討されている。しかし、それらの研究の対象は単一機械問題に限られている。

本論文では、複雑な計画条件が設定されている現実の問題を対象にして、従来では業務担当者の経験や勘によって行われている生産スケジュールリング段階におけるきめ細かい能力調整を、少ない能力追加で納期遅れジョブ数を最小にすることを目的として系統的に行うことを検討する。

生産スケジュールリングに有効な技法としては、OR手法、AI手法、シミュレーション法などがあるが、能力調整に直接関係する機械の操業カレンダーなど現実の複雑な計画条件を考慮できることやスケジュール作成が短時間で行えること、さらに現実に稼働中のシステムが存在することから見て、シミュレーション法が実用上最も有用性が高いと考えられる〔13〕。このことから、シミュレーション法によるスケジュール生成をここでは能力調整に利用する。

本研究では、能力追加(残業)による能力調整に焦点を絞り、スケジュールリング段階において、シミュレーション法を利用する能力調整法を提案する。提案法では、効果的に能力調整を行える少数のパラメータを導入し、系統的にパラメータを操作することで追加能力の設定を変化させて、最適な能力調整の条件を見出すを試みる。

以下ではまず2.で、シミュレーション法に基づき

パラメータによる系統的な変数操作を組み込んだ能力調整法を提案する。3.ではまず、設備、時刻、追加能力の程度を系統的に操作するために、二つのパラメータを導入し、ついでそれらのパラメータを組み込んだ能力調整法を具体的に提示する。4.では現実の計画条件データを利用して、提案法を適用したスケジュールリングを行うことで提案法の有効性を評価する。

2. シミュレーション法利用の能力調整法

ジョブショップ型の生産工場を対象としてスケジュールリング段階で能力追加の決定は、どの設備に、どの期間(時間帯)、どれだけの能力を追加するかを決めることである。この決定にあたっては、上位から与えられた計画条件にこの能力追加した条件下で、スケジュールを作成し、そのスケジュール結果において納期遅れジョブが発生しないこと、または納期遅れが不可避な場合には遅れの程度を極力減らすことが求められる。

しかしながら、ジョブショップスケジュールリングにおいては、ジョブの割付け方によりスケジュール結果が大きく変わるため、納期遅れに関する要件を満たすよう適切に能力追加を行うのは一般に困難である。とりわけ、追加能力によって納期遅れの解消に効果的であると考えられる‘ネック’となっている設備は通常一杯使用されているため、効率的な能力追加を設定するのが難しい。さらに、適切な能力追加の設定条件を見つけるために、設備、期間あるいは日時、追加能力の程度などすべてを独立な操作変数にすると、組み合わせが膨大になり、全条件を調べることは実質的に不可能である。また、組み合わせを順次調べていくとしてもスケジュールのジョブ割付け結果はもぐらたたき的な結果となってしまう結果の収束は難しいことが予想される。

このような困難をもつ能力調整の問題を解決するため、ここではパラメータ空間探索改善法〔14〕(以下、PSSI法と呼ぶ)を導入する。PSSI法は、シミュレーション法によるスケジュール作成において、効率的にスケジュール改善を行うための系統的な方法として提案され、その有効性が確認されている方法である。PSSI法の解法の枠組みは、ごく少数のパラメータを設定し、問題としている操作変数をパラメータの媒介により系統的に変化させ、パラメータで張られる部分空間内で最良となる解を見出そうとする枠組みである。この枠組みは汎用性を有するので、本論文ではこの枠組みを能力追加を決定する問題に適用し具体的に展開する。

設備能力とジョブの割付けの関係に関しては次のよ

うな条件を設定する。

- (a) ジョブの作業は休日以外の毎日の「正規稼働時間+追加能力」の枠内で行われる。
- (b) 各設備での正規稼働時間は開始可能時刻と終了時刻が設備ごとに与えられている。
- (c) 追加能力として付加できる残業時間は設備ごとに異なってもよい。その最大値は各設備の正規稼働時間の終了時刻からメンテナンス開始時刻までの時間（これを“最大追加能力”と呼ぶ）とする。
- (d) 追加能力を付与した場合でも正規稼働時間終了時刻から一定時間以上遊休になるような追加能力の付与は行わない。また、設備によって追加能力の最後に遊休が入るような場合は、当該設備の追加能力からその遊休分を差し引いて付加する。

なお、作業の中断/再開とジョブのオーバーラッピングは計画条件で指定された場合シミュレーション法によるジョブの割付け過程で考慮するが、ジョブのロット分割（管理単位の変更）は想定しない。

以上の条件のもとで能力追加の問題に関して PSSI 法により実用的な意味で十分に効率的に最良解が求まるためには、導入するパラメータの選択が決定的に重要となるが、ここではまず、適切なパラメータがあるものとして、シミュレーション法によるスケジュール生成を利用した PSSI 法の能力調整法として以下の手順を提案する。

第1ステップ：当初計画条件に基づく各設備の稼働率の状況調査

当初の計画条件下でスケジュールを生成し（当初スケジュールと呼ぶ）、各設備の稼働状況の情報を得る。この情報は、各設備に付与する追加能力の程度を調節するために用いる。

第2ステップ：パラメータ空間の設定

追加能力の大きさ、時刻、設備を系統的に操作する少数のパラメータを導入し、パラメータ空間を設定する。パラメータの値の範囲、刻み値を決め、格子点を設定する。

第3ステップ：追加能力の付与とスケジュール生成

パラメータ空間内の各格子点について以下の処理を繰り返す。

(3.1) 能力割り当て

格子点のパラメータの値により決められる追加能力を各設備に付与する。本研究では、残業による能力追加を考えるため、各稼働日の完了予定時刻に追加能力を付加する。この時点で付与された能力を“当初追加能力”と呼ぶこととする。

(3.2) ジョブ割付け

当初追加能力の付与終了後、予め設定されている条件を考慮して、シミュレーション法により、ジョブを各設備に割り付ける。

(3.3) 余剰能力削除

(3.2)で作成したジョブ割付け結果において、当初追加能力のうち未稼働の時間を削除する。さらに、各設備について、当初追加能力時間帯に作業が効果的に割り付けられていない日では、一定の基準に従って、能力追加を行わないようにする。この削除操作により各設備に対する“追加能力”を決定する。

(3.4) 再ジョブ割付け

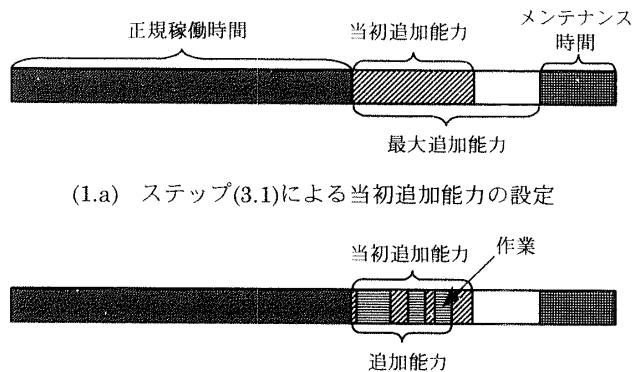
追加能力を決定後、設定条件に従ってシミュレーション法により、再び設備にジョブを割り付ける。

第4ステップ：最良能力調整案の選定

第3ステップにより生成した複数のジョブ割付け結果の中から、納期遅れジョブ数が最小あるいは目的の指標値が最良のジョブ割付け結果を選定し、その結果を与える設定条件を最良の能力調整案とする。なお、能力追加の総量などに制約がある場合には、その制約を満たす設定条件の中で最良の案を選定する。

上記手順の第3ステップにおける、当初追加能力と余剰能力削除後の追加能力の関係を図1の概念図に示す。

上記の手順では、パラメータ空間内の各格子点について、(3.4)のステップで再度スケジュールを作成している。これは(3.3)の余剰能力削除ステップにおいて、(3.2)のスケジュールで作業が割り付けられた時間帯でも効率が悪い場合には割り付けを不可能と再設定するため、再スケジュールが必要となるからであ



(1.a) ステップ(3.1)による当初追加能力の設定

(1.b) ステップ(3.2),(3.3)による追加能力の設定

図1 追加能力の設定の概念図

(一日あたりの稼働時間に対する設定)

る。提案した能力調整法では余剰能力削除ステップを設けることに一つの特長があり，なるべく少ない能力追加で納期遅れをなくすことをめざしている。

3. パラメータ空間の設定と能力調整手順

3.1 パラメータ設定

実用的に意味のある能力調整案を見出せるかどうかは，パラメータの選び方に依存する．ここでは2つのパラメータを導入し，そのパラメータにより，設備への能力付与の分布と追加量の上限を決めることにする．さらに，能力を追加する期間は，能力調整手順の余剰能力削除ステップで削除されなかった期間をもって能力追加期間とする．

導入する2つのパラメータを a ， b と記し，それぞれに次の役割を持たせる．

a ：追加能力の総量と一日あたりの追加能力の最大量の制御

b ：設備に対する追加能力の分布の制御

この2つのパラメータを用いて，設備 i に対する当初追加能力 K_i を次の式で決める．

$$K_i = aK_i^{\max} f(x_i, b) \quad (1)$$

ここで， K_i^{\max} は設備 i の最大追加能力であり， x_i は設備 i に対応させる $[0, 1]$ 区間の実数値である．本論文では， x_i を当初の計画条件によるスケジュールから得られる設備の稼働率から決める．すなわち，設備の稼働率の降順に等間隔に1から0の値を次式で与える．

$$x_i = \frac{\text{設備の総数} - \text{設備 } i \text{ の稼働率の順位}}{\text{設備の総数} - 1} \quad (2)$$

これにより， x_i の値として稼働率が最も高い設備には1が，最も低い設備には0が対応付けられる．

式(1)でパラメータ a を係数として導入するのは，一日あたりの能力を必要以上に追加し，ジョブの割り付けが前詰めになり過ぎることを防ぐためである．なお， a の変域は $[0, 1]$ とし， $a=1$ を当初追加能力の上限値に， $a=0$ を追加能力なしに対応させる．

一方，パラメータ b は，(1)式の関数 $f(x, b)$ を x の関数と見たとき，その形状を変えるパラメータとして用いる．具体的には，

$$f(x, b) = 1 - \sqrt[b]{1 - x^{1-b}} \quad (0 \leq b \leq 1) \quad (3)$$

$$f(x, b) = 1 + \sqrt[b]{1 - (1-x)^{1+b}} \quad (-1 \leq b < 0) \quad (4)$$

と設定した．この関数を用いることにより，関数値は x の値を変化させたとき b の値により図2のように変化する．(1)式によって当初追加能力を決める際，パラメータ b の値設定により，稼働率が最も高い設備から初めてどの範囲の設備にどれだけの能力を追加するかという，能力付与の分布のパターンを変化させ

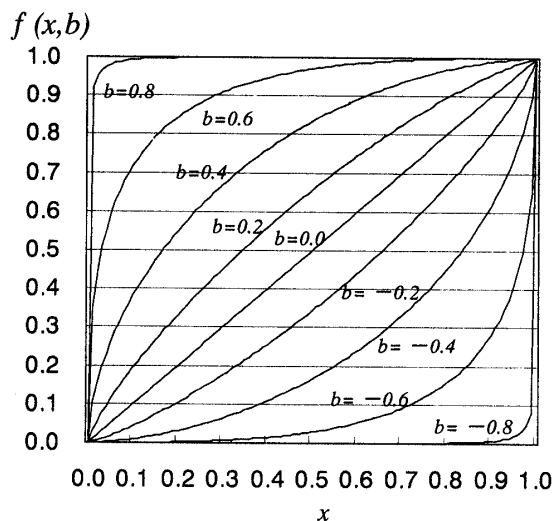


図2 異なる b に対する $f(x, b)$ の関数値

ることができる．なお，関数 $f(x, b)$ の具体的な形は，パラメータ b により分布のパターンを変化させることができればよいので，必ずしも(3)，(4)の関数に限る必要はない．

これら2つのパラメータから，それらの直積を取ることにより最良解を求めるための探索空間を設定する．

3.2 能力調整手順の具体化

シミュレーション法を利用した能力調整法を具体化するためには，導入するパラメータの選択に加えて，スケジュール作成の方式，(3.3)に用いる余剰能力削除の詳細，および第4ステップで最良とする能力調整案を選定する基準を指定する必要がある．ここでは，それらの指定について述べ，次章で提案法の有効性を検討する．

まずスケジュール作成は，納期関連の評価指標に関して優れた性能を有するバックワード/フォワード・ハイブリッドシミュレーション法タイプC(15) (以下，BFHS/type C法と略記する)を用いる．バックワード/フォワード・ハイブリッドシミュレーション法はバックワードシミュレーション (以下，BSと略記する) とフォワードシミュレーション (以下，FSと略記する) を段階的に組み合わせるスケジュール生成方法であり，BSによって作成されたジョブ割り付け結果から得られる情報をFSに利用することにより，納期重視型のスケジューリングを行う手法である．BSとFSの組み合わせ方にはいくつかのタイプがあるが，ここで採用するタイプCでは，BSによるジョブ割り付け結果での各工程のジョブの作業順序をFSのジョブ割り付け優先順序に利用する方式である．

つぎに(3.3)余剰能力削除は以下の詳細に従って行う。

(3.3) 余剰能力削除

(3.2)で作成したスケジュールについて、当初追加能力の稼働状況を稼働日ごとに調べて、次の処理を行う。

- (i) 当該日の作業完了時刻が当初追加能力の終了時刻よりも早い場合では、追加能力の終了時刻を作業完了時刻に早める。
- (ii) 当初追加能力内の作業効率が悪い場合では、能力を追加しないように設定する。ここでは、当初追加能力の開始時刻から30分以上稼働していなければ能力の追加は行わない。
- (iii) (i), (ii)以外の場合では、当初追加能力を追加能力とする。

最後に、第4ステップの最良能力調整案の選定では、納期遅れジョブ数が最小のスケジュールを選定し、そのスケジュール案に設定されている追加能力の条件を最良の能力調整案とする。納期遅れジョブ数が等しいスケジュールが複数存在する場合は、総残業量が最小のスケジュールを選定する。

パラメータ空間内での納期遅れジョブ数が最小のスケジュールの選定は、パラメータ空間内での得られる全スケジュールについて列挙法により選定を行う。シミュレーション法により最適解を求めるための探索については、パターン法[16]などの発見的方法が提案され、上位の生産計画問題に対して比較・検討がなされている[17]~[19]。列挙に要する時間が長い場合にはこのような探索法を能力調整手順に組み込む必要があるが、スケジュール生成に用いるシミュレータ[20]が高速であるため、次章で取り上げるような複雑な計画条件が設定されている現実問題であっても現実的に意味のある能力調整案が短い時間で得られるのでここでは列挙法を用いる。

4. 提案法の有効性評価

本章では、現実のジョブショップ型機械工場で用いられた計画条件データを利用して、提案法の有効性を評価する。まず計画条件データの特徴を述べた後、能力追加を決めるために導入したパラメータ a と b の組み合わせに関する評価を行い、ついで提案法により作成したスケジュールの納期関連および追加能力に関する指標値を調べることににより評価を行う。

4.1 計画条件データの特徴

ここでは、鉄道車両用部品を製造する企業におけ

る、実際に稼働しているジョブショップ型の機械加工工場のスケジューリングシステムで過去50カ月間に現実に使われた50の計画条件データ[21]を用いる。各データには1~1.5カ月分の計画条件が設定されており、その特徴は以下の通りである。

(I) 製造工程の規模および操業条件

- 工場内の作業場は16であり、各作業場には1~6台の同一性能の機械が配置されている。月によって全く使用されない作業場(機械)もある。
- 各機械には操業カレンダーが設定されており、加工可能な時間と不可能な時間が決められている。なお、操業カレンダーは上位部署で設定された条件である。

(II) ジョブおよび工程作業の特徴

- 計画の対象となるジョブの総数は月によって異なり、100~200である。また、各月とも計画対象ジョブの約3割は計画時点で工場内に仕掛っている。
- 各ジョブには、品目名、数量、納期および着手可能時刻が指定されている。
- ロットサイズは1~250であるが、約8割のジョブはロットサイズ20以下である。
- ジョブごとに作業の種類と作業順序が決まっている。1ジョブあたりの作業数は1~12であり、各作業を行う作業場は一意に決められている。通過工程のパターンはすべて直線型であるが、同一の作業場を複数回通過するパターンも存在する。
- ジョブの総加工時間は5時間から数百時間となっている。個々の作業の加工時間は段取り時間と正味加工時間の和であり、正味加工時間はロットサイズ×単位加工時間で算出する。段取り時間や単位加工時間は、実績に基づいて決められた値を用いる。
- 各ジョブに設定されている納期は、納期係数(=(納期-リリース時刻)/総加工時間)を用いて表すと、0.7~80とばらつきが大きいだが、約半数のジョブの納期係数は10以下である。

なお、正規稼働時間と追加能力の設定による作業の中断/再開、段取り時間の品種切り替え依存、搬送時間の存在、オーバーラッピングの存在は考慮するが、ジョブのロットの分割は行わない。

4.2 パラメータの設定と特性

列挙法を用いて納期遅れジョブ数最小となる能力調整案を選定する場合、パラメータ a と b の刻みを細かくすればより優れた最良解を選べる可能性は高まるが格子点の数に比例して計算時間も増加する。50計

画条件データから数件の計画条件データを選んで行った試行・検討に基づいて、ここでの評価には、パラメータ a は $0 \sim 1.0$ の範囲を 0.2 刻み (6 通り) で、 b は $-1.0 \sim 1.0$ の範囲を 0.2 刻み (11 通り) として、50 計画条件データに対して共通に設定することにした。この設定では、 $a \times b$ の 2 次元直積パラメータ空間内に 66 点の格子点を設けることになり、最良の能力調整案は 66 個のスケジュール結果を比較して選定することになる。最良の能力調整案を得るのに要する計算時間は CPU が Pentium III 550 MHz のパーソナルコンピュータで約 10 分程度 (1 格子点あたり約 10 秒弱) であり、また次節に述べるように現実的に実施可能な能力調整案が得られるので、この刻み幅の設定は妥当と考えられる。

つぎに提案能力調整法におけるパラメータ a と b の特性を考察する。納期遅れジョブ数最小となる能力調整案を与えるパラメータ a と b の組を表 1 に示す。ここで表中の数值は、その位置で示されるパラメータ値により最良解が得られた計画条件データの件数を表している (0 件の場合は空欄とし、また当初計画条件下で納期遅れジョブが発生しなかった 2 件のデータは除いた)。パラメータ $a=1.0$ の値はパラメータ b で与えられる能力付与分布の下で最大の能力の追加を与えるが、表 1 は必ずしもこの場合のみ納期遅れジョブ数最小のスケジュールが得られるとは限らないことを示している。各格子点に対応して生成されるスケジュールの納期遅れジョブ数評価値のパラメータ空間上での曲面を、個々の計画条件データごとに調べると、形状は個々の計画条件データごとに異なるものの、比較的フラットな部分がパラメータ a が $0.5 \sim 1.0$ 、 b が $-0.6 \sim 1.0$ の領域に出現し、その内部で最良解の得られることがわかった。これらのことから 2 つのパラメータ a と b を組み合わせることにより、能力追加案を決める上で有効なパラメータ空間の形成されていることがわかる。

表 1 最良解を与えるパラメータの値と計画条件データの件数

$b \backslash a$	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
-1.0						
-0.8						
-0.6				1		
-0.4			1		1	2
-0.2				1	2	4
0.0					2	5
0.2				2	3	4
0.4			2			8
0.6					1	3
0.8					1	4
1.0						1

4.3 納期遅れと残業時間に関する評価

提案法により作成された能力調整案の評価は、能力調整案によって決まった能力追加量、すなわち残業時間の多さと、その能力調整下で作成されたスケジュールの納期関連および残業時間に関する評価指標値によって行う。これらの評価は、能力を追加しない条件下で生成した当初スケジュールおよび「休日ありフル稼働」条件下で作成したスケジュールと比較する。ここで、「休日ありフル稼働」条件とは休日を除く稼働日を一日 3 時間のメンテナンス時間以外はすべて稼働可能とする条件である。この条件で与えられる追加可能な能力は式 (1) の最大追加能力 K_i^{\max} である。この条件下で得られるスケジュールの納期関連の評価指標値は納期遅れジョブ数最小化に対する改善の「限界値」と見なすことができる。

表 2 に追加能力の各設定条件下で作成したスケジュールの納期関連の評価指標の比較を示す。表中のいずれの値も 50 計画条件データに関する平均値である。納期遅れジョブ数割合に限らず、平均納期遅れ、最大納期遅れのいずれにおいても、提案法が与えるスケジュールの結果は当初スケジュールに比べて大幅に減少しており、限界とみなせる「休日ありフル稼働」条件下でのスケジュールの結果とほぼ同一である。図 3 に、計画条件データ 50 件の納期遅れジョブ数割合の分布を示す。横軸の各範囲内に存在する納期遅れジョ

表 2 各設定条件下で作成したスケジュールの評価

設定条件	納期遅れジョブ数割合 (%)	平均納期遅れ (時間)	最大納期遅れ (時間)
提案法	8.6	7.0	123.9
当初計画条件	27.9	86.9	300.4
「休日ありフル稼働」	8.5	6.1	125.6

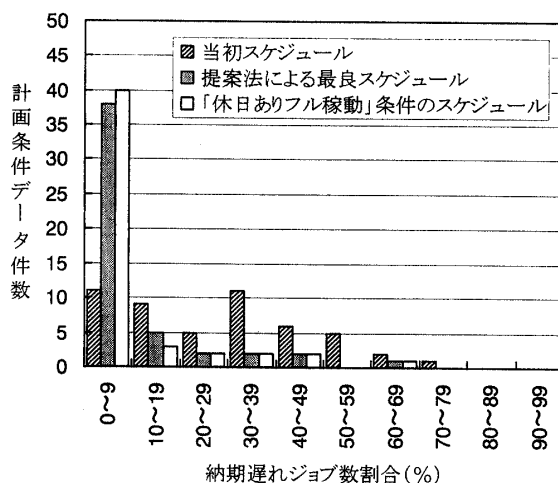


図 3 納期遅れジョブ数割合の比較

ぶ数割合を与えている計画条件データの数を縦軸にとっている。なお、スケジュール結果で納期遅れが発生しなかった計画条件データは、当初スケジュールでは2件、「休日ありフル稼働」条件のスケジュールでは13件であり、提案法によるスケジュールでは9件であった。図3から、個別に計画条件データを見ても、提案法により「休日ありフル稼働」条件下のスケジュールと同程度の納期遅れジョブ数の減少が得られていることがわかる。

以上から提案法により納期遅れジョブの減少が限界値と同程度まで達成できることが明らかとなったが、減少の程度が優れていても追加能力が多ければ、適切な能力調整が行えたとは言えない。このことから、次に追加能力すなわち残業時間に関する評価を行う。

表3に、選定された能力調整案と「休日ありフル稼働」条件での能力計画に関して、そこで設定される残業時間の比較を示す。なお、表中のいずれの値も48計画条件データの平均値である。(当初スケジュールで納期遅れジョブが発生していない計画条件データは除外した。)「休日ありフル稼働」条件に比べて、選定された能力調整案のいずれの指標の結果も大幅に改善された値と言える。総残業時間においては、選定された能力調整案は「休日ありフル稼働」条件に比べて1/6程度にまで減少している。「休日ありフル稼働」条件では実質的に実現困難な残業時間が設定されているが、提案法による能力調整案では一日一設備あたりの残業時間が1時間以下であることから現実に実施可能な結果である。

さらに、追加能力の設定の効果を調べるため、能力を追加した期間での稼働率(以下、追加期間稼働率と呼ぶ)を検討する。ここで、追加期間稼働率とは、能力を追加した期間に割付けられた総作業時間を追加能力の総計で割った値である。能力を各設備に付与するにあたり、パラメータ b を用いて設備間の付与の大きさを制御しているので、ネックとなっている設備とそれ以外の設備(非ネック設備と呼ぶ)を区別して評価する。ネックとなっている設備では追加期間稼働率は高くなることが考えられるが、非ネック設備では追加能力の付与の仕方によっては低いことも考えられる。

ここでは、当初計画条件によるスケジュールから得

られる稼働率の降順に $\lfloor 0.2 \times \text{設備総数} + 0.8 \rfloor$ ($\lfloor \cdot \rfloor$ 内の小数点切り捨て)番目までの設備をネック設備、それ以外を非ネック設備とみなす(この区分は、(2)式の x の値が0.8以上の設備をネック設備、0.8未満を非ネック設備とするのに同じである)。全く使用されない設備を設備総数から除外すると、ネック設備の数は計画条件データにより異なるが全設備数の15~25%程度(3~4台)である。表4に各条件下で得られたスケジュールから算出した追加期間稼働率を示す。ネック設備と非ネック設備のそれぞれの追加期間稼働率において、提案法によるスケジュールは「休日ありフル稼働」条件下でのスケジュールに比べて40%以上も高く、それぞれの大きさも同程度である。したがってネック設備と非ネック設備の両者に対して効果的に能力が追加されていることがわかる。さらに、全設備の平均追加期間稼働率からも、提案法により効果的な追加能力が設定されていると言える。

なお、能力調整法における最大の追加能力はパラメータ $a=b=1$ で設定されるので、この場合について調べておく。パラメータ $a=b=1$ における平均の納期遅れジョブ数割合は10.4%、平均の総残業時間は1119.9時間であり、表2の最良解の結果と比較すると、能力を能力調整の手続きの中で最大限追加しているにもかかわらず、最良解の方が納期遅れジョブ数割合の小さい良い結果が得られていることがわかる。一方、平均の総残業時間は、パラメータ $a=b=1$ の場合の結果は、表3に示す「休日ありフル稼働」条件下の結果の1/6であることから、能力調整の手続きの中で余剰能力を削除する効果が顕著であることがわかる。

本方法では当初追加能力を設定し、シミュレーション後に余剰能力の削除、再シミュレーションという手順をとっていることから、各パラメータ値の組み合わせの小さい変化に対してジョブの割り付け状況が大きく変化し、納期遅れジョブ数や追加能力が大きく異なることが予想される。このことから、個々の組み合わせ条件による結果を比較検討して、最良解を確実に見出すために列挙法を適用した。

今回の実験で調べた各パラメータの刻み幅においては計画条件データ1件あたりの計算時間が10分程度であるものの、得られた最良解は目標値とみなせる

表3 設定された残業時間に関する比較

設定条件	総残業時間 (時間)	一日あたりの 平均残業時間 (時間)	一日一機械 あたりの平均 残業時間(時間)
提案法	988.6	19.8	0.9
「休日ありフル稼働」	6064.7	121.3	5.8

表4 追加期間稼働率の比較

	ネック設備 (%)	非ネック設備 (%)	全設備 (%)
提案法による スケジュール	77.4	69.1	72.0
「休日ありフル稼働」 条件のスケジュール	34.1	13.4	18.0

「休日ありフル稼働」条件の結果に対して、納期遅れジョブ数割合で差が0.1%である。さらに、当初計画の結果に対する最良解の納期遅れジョブ数割合の改善量は20%程度である。これらの結果から、もし刻み幅を1/2にして格子点数を増加させた場合でも目標値までの最良解の改善量は納期遅れジョブ数割合で高々0.1%程度であり、刻み幅を細かくし、計算時間を4倍にする効果は当初計画条件から今回の刻み幅による能力調整を考慮したほどは期待できない。したがって本計算で適用したパラメータの刻みで効果的な解が得られていると考えられる。また、本数値実験の計算時間は現実の計画業務担当者が日常の中で代替案の検討できる範囲と見なせる実用的な値である。

以上の納期関連および残業時間に関する指標値から、提案法は納期遅れジョブ最小化の目的に対して、効果的な能力調整法であることが示された。

4.4 総残業量時間の上限に対する提案法の対応

現実の、計画および実施の条件では、月や日ごとに総残業時間の上限が設定されている場合が多い。本節では、総残業時間と納期遅れジョブ数の関係を調べ、総残業時間に上限が設定された条件下での最適な能力調整案の設定に対する提案法の適用について検討する。

図4は、ある1つの計画条件データを例にとり、パラメータ空間内の各格子点で得られる能力調整案とスケジュールに関して、総残業時間と納期遅れジョブ数の関係をプロットした。図4における全体の分布は、残業時間を多く設定すれば納期遅れジョブ数は減少する傾向を示している。総残業時間の上限が例えば400時間である場合には、図に示す点A、すなわち総残業時間の制約を満たす納期遅れジョブ数最小の能力

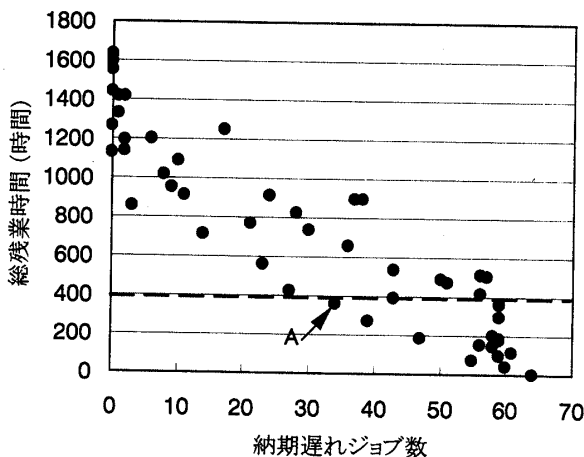


図4 ある一つの計画条件データにおける総残業時間と納期遅れジョブ数

調整案を選べばよいことがわかる。最良解の選択に列挙法を用いていない場合には、この問題を納期遅れジョブ数と総残業時間の2目的数理計画と見たとき、総残業時間制約を満たす非劣解を十分な精度で効率的に探索する方式を見出し能力調整手順に組み込むことも必要になる。

以上の考察より、残業時間に制約が課された条件下では、

- (1) パラメータ空間内で作成される複数のスケジュール案から、追加能力の合計が総残業時間の制約を満たすスケジュールを選択し、
- (2) 選択されたスケジュール案から納期遅れジョブ数最小あるいは評価指標値が最良のスケジュールを与える能力調整案を選定する、

手順を2.で提案した能力調整法の第4ステップでとればよい。

5. おわりに

本研究では、ジョブショップ型生産形態の工場を対象として、スケジューリング段階における能力調整の必要性をまず論じ、生産スケジューリング段階におけるシミュレーション法利用の能力追加(残業)による能力調整法を提案し、現実の計画条件データを用いて、提案法の有効性を評価した。提案法はパラメータ空間探索改善法の枠組みを能力追加を決定する問題に適用している。提案法は、まず設備の稼動状況を考慮し、パラメータによって系統的に各設備に能力を割り付け、さらに余剰能力削除を行った後、複数の能力調整案から最適案を選定するのがその手順概略である。

現実の計画条件データを用いた提案法の評価結果では、作成されるスケジュールは限界値と同程度の納期関連の評価基準値を持ち、計画条件としては実施可能な残業時間が設定された能力調整案を提案法によって作成できることを示した。さらに、追加能力に上限が設定される場合についても検討し、提案法に制約条件を考慮して解の候補を絞る手順を追加することにより対応できることを示した。

本研究では、残業による能力調整法について提案法を適用したが、休日出勤が許される場合や残業不可能な特定日が存在する場合には、追加能力の付与手続きで限定条件を設定することで提案法を適用できると考えられる。さらに、本研究ではスケジュール生成にBFHS/type C法を用いたが、提案法は特定のスケジュール生成法を前提としていないので、現実に用いられているスケジューリングシステムに提案法を適用し能力調整を行うことも可能と考えられる。

本研究では、データ解析にあたり関西大学大学院管理工学専攻科の佐藤 剛君と関西大学工学部管理工学科の清田頭治君の協力を得た。また、本研究のケーススタディでは住友金属工業(株)製鋼所の方々の協力を得た。ここに深謝いたします。

参 考 文 献

- [1] 冬木正彦, 荒川雅裕, 杉原俊昭, 井上一郎: “納期遅れジョブ数最小化を目的としたシミュレーションベースのスケジュール作成法”, システム制御情報会論文誌, Vol. 11, No. 7, pp. 394-400 (1998)
- [2] 藤本英雄: “生産スケジューリングの動向”, 計測と制御, Vol. 33, No. 7, pp. 533-540 (1994)
- [3] 圓川隆夫, 黒田 充, 福田好郎(編): 「生産管理の辞典」, 朝倉書店, pp. 448-463 (1999)
- [4] 人見勝人: 「生産システム工学 (第2版)」, 共立出版, pp. 131-133 (1990)
- [5] 圓川隆夫, 黒田 充, 福田好郎(編): 「生産管理の辞典」, 朝倉書店, pp. 64-67 (1999)
- [6] Salegna, G.: “Integrating and Scheduling Systems in a Job Shop”, *Production and Inventory Management Journal*, Vol. 37, No. 4, pp. 1-7 (1996)
- [7] Enn, S. T.: “Finite scheduling: Performances when Due-Dates are Internally Set”, *Production and Inventory Management Journal*, Vol. 36, No. 3, pp. 5-10 (1995)
- [8] 宋 相載, 崔 貞姫, “セル見込み生産下での受注品の諸意思決定問題の統合化”, 日本機械学会C編, Vol. 60, No. 573, pp. 411-419 (1994)
- [9] 森川克己, 高橋勝彦, 中村信人: “ジョブショップ環境における生産計画とスケジューリング問題に対する一解法”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 49, No. 4, pp. 229-230 (1998)
- [10] 中野一夫: “全体最適化を目指した新しいスケジューリングアプローチ”, 経営システム, Vol. 9, No. 3, pp. 137-141 (1999)
- [11] 浅野 誠, 太田 宏: “異なる到着時間と納期の下で稼働停止時間帯と段取り時間を考慮したスケジューリング”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 47, No. 6, pp. 335-343 (1997)
- [12] 浅野 誠, 太田 宏: “稼働停止時間を考慮した単一機械納期厳守スケジューリング”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 49, No. 4, pp. 219-227 (1999)
- [13] 井上一郎, 冬木正彦: “シミュレーション法活用の生産スケジューリング支援”, 計測と制御, Vol. 33, No. 7, pp. 547-553 (1994)
- [14] 冬木正彦, 荒川雅裕, 古市吉男, 井上一郎: “シミュレーションベース納期重視型生産スケジューリングの改善フェーズにおけるパラメータ空間探索改善法”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 48, No. 6, pp. 370-377 (1998)
- [15] 冬木正彦, 井上一郎: “バックワード/フォワード・ハイブリッドシミュレーション法に基づく個別受注生産における納期重視型生産スケジューリング”, 日本経営工学会誌, Vol. 46, No. 2, pp. 144-151 (1995)
- [16] Hooke, R., and Jevess, T. A.: ““Direct Search” Solution of Numerical and Statistical Problems”, *Journal of the Association for Computing Machinery*, Vol. 8, pp. 212-229 (1961)
- [17] Vergin, R. C.: “Production Scheduling Under Seasonal Demand”, *Journal of Industrial Engineering*, Vol. 17, pp. 260-266 (1966)
- [18] Jones, C. H.: “Parametric Production Planning”, *Management Science*, Vol. 13, No. 11, pp. 843-866 (1967)
- [19] Taubert, W. H.: “A Search Decision Rule for the Aggregate Scheduling Problem”, *Management Science*, Vol. 14, No. 6, pp. B 343-359 (1968)
- [20] 日本電気: “生産計画立案/評価支援ツールズシステム PROPS”, 計測と制御, Vol. 30, No. 2, pp. 179-180 (1991)
- [21] 日沖幸治, 鹿島正孝, 岡沢雄二, 酒井智幸, 冬木正彦, 太田孝夫, 井上一郎: “機械加工工場におけるスケジューリング・システム—ノウハウ活性化シミュレーション・ツールズシステム PROPS の適用”, 日本OR学会1990年秋期研究発表会アブストラクト集, pp. 48-49 (1990)