

Original

A Simulation-Based Production Scheduling Method Aiming to Optimize Due-Date Related Criteria ——Schedule Generation Method and Due-Date-Deviation Minimization——

Masahiro ARAKAWA¹, Masahiko FUYUKI¹ and Ichiro INOUE²

Abstract

A simulation-based scheduling method for minimizing the due-date-deviation is proposed on the basis of a combination of the BFHS (Backward/Forward Hybrid Simulation) method and the parameter-space-search-improvement method. In order to minimize the due-date-deviation in a simulation-based scheduling, two functions are indispensable: the first function is to control operation-onset timing of jobs at all work centers to avoid inadequate early completion of jobs, and at the same time to determine job priorities so as to suppress the late completion of the job, and the second is to adjust the balance of the two reductions properly so that the final schedule achieves the minimization of the due-date-deviation.

In this paper, a new schedule generation method named the BFHS/type D is first proposed, in which the information generated during the backward simulation is utilized to control operation-onset timings and job priorities in the forward simulation. Then, after the investigation of the backward simulation characteristics, two parameters are introduced in relation to due-date-deviation to manipulate directly the backward simulation process and consequently to manipulate indirectly the forward simulation process in the BFHS/type D method. Finally, a scheduling procedure is proposed to search out the best schedule with respect to the due-date-deviation on the space spanned by the two parameters.

The effectiveness and efficiency of the proposed method is demonstrated by using a set of planning conditions obtained not only from a simple job-shop model, but also from a practical large-scale system.

Key words: simulation, scheduling, jobshop, due-date-deviation minimization

¹ Kansai University

² Kyoto Sangyo University

Received: May 19, 2000

Accepted: March 2, 2001

納期関連評価指標値の最適化を指向する シミュレーションベース生産スケジューリング ——スケジュール生成法と納期はずれ最小化スケジューリング法——

荒川 雅裕¹, 冬木 正彦¹, 井上一郎²

生産スケジュールにおけるジョブの納期遅れと納期前ずれの和を“納期はずれ”評価指標値と呼び、その最小化を目的とするシミュレーションベースのスケジューリング法を提案する。シミュレーション法を用いて、納期はずれを最小とするスケジュールを作成するためには、(a)納期遅れだけでなく納期前ずれも少なくできるようなジョブ割付けの制御機能と、(b)納期遅れと納期前ずれの程度を調整する機能が必要となる。本論文では、まず(a)の機能を備えたスケジュール生成法として、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D (BFHS/type D)を提案する。つぎに、(b)の機能は、パラメータ空間上で最良スケジュールを探索する方式により実現する。BFHS/type D法の第1ステップで実行するバックワードシミュレーションの特性を検討し、それに基づいて、納期はずれが最小となるスケジュールを求めるためのパラメータ空間とスケジューリングの手順を提案する。提案したスケジューリング法の評価に関しては、単純ジョブショップ過程モデルを用いるだけでなく、さらに現実に稼働中のスケジューリングシステムから得られた計画条件データを用いてその有効性を明らかにする。

キーワード：シミュレーション、スケジューリング、ジョブショップ、納期はずれ最小化

1. はじめに

個別受注生産においては、顧客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の1つである。客先納期を厳守するため生産計画部門においては、客先納期に若干余裕を持たせて工場における納期（工場納期）を設定し、生産スケジューリング業務遂行部門に対し計画条件（計画対象ジョブと利用可能な諸資源に関する諸条件）を示し、生産スケジュールの作成を要請する。これを受けて生産スケジューリング部門では、納期遅れを出さずかつ仕掛り在庫を抑えしかも製品在庫を最小にするようなスケジュールの作成に努める。生産計画部門からは、「全てのジョブが工場納期を順守しうる程度に負荷調整された計画条件」が課せられるのが通常とされているが、現実には、継続的な生産性向上を下位部門に図らせる意味でも、多少過負荷気味の計画条件を意図的に生産スケジューリング業務遂行部門に課するのが通常となっている。したがって、作成されるスケジュールにおいては工場納期に対して納期遅れジョブの発生が少なくない。若干の納期遅れジョブが発生しても、客先納期に対し余裕を持たせてあること、さらに工場納期に対し

て不必要に早く完了するジョブもあることから、製造現場ではやりくりによって、客先納期をまっとうするように努めている。この際には、納期に対してジョブの“遅れ”時間とジョブの“早く完了しすぎ”る時間の程度が問題となる。したがって、生産スケジューリング部門としては、この“遅れ”（納期遅れ）と“早く完了しすぎ”（納期前ずれ）の程度を極力最小にしておくことが、生産管理上極めて重要である。

生産管理的立場からみると、一般的に“納期前ずれ”は納期余裕とも称され、完成品としての在庫費用の発生によるロスのみを考慮すればよいと考えられ、“納期遅れ”（納期うしろずれ）と比べれば、ロスの程度は低いと考えられている。しかしながら、個別受注生産品目の種類によっては、“納期前ずれ”による経済ロスは“納期遅れ”のそれよりも大きくなることもある。たとえば、完成品が大型で在庫スペースがかぎられており、“納期前ずれ”発生を抑制するために製造工程全体の生産速度を下げざるを得ないことによるロス発生の場合とか、また、完成品の製品劣化が速く、“納期前ずれ”は事実上製品価値の消失を生じせしめる場合とかである。

つまり、“納期遅れ（納期うしろずれ）”によるロスと“納期前ずれ”によるロスとの相対比較においては多様なケースが考えられる。本論文では、第一段階として、“納期遅れ（納期うしろずれ）”ロスが“納期前ずれ”ロスに等価な場合に焦点をあてる。そして、ジ

¹ 関西大学

² 京都産業大学

受付：2000年5月19日、再受付（3回）

受理：2001年3月2日

ジョブの完了時刻と（工場）納期との差の絶対値の計画対象全ジョブに関する総計を“納期はずれ”量と呼ぶこととし、納期はずれ最小化を目的とする現実の問題に対する生産スケジューリング法について検討する。（通常、納期遅れと納期前ずれの代数的な和は“納期はずれ”と呼ばれている〔1〕が、それと区別するためここでは“納期はずれ”と呼ぶこととする。“納期はずれ”最小化のためには、納期遅れと納期前ずれの大きさが共に小さくなることが求められる。）

納期はずれ最小化に関連するスケジューリング問題については、これまでにいくつかの研究がなされている。たとえば、全ジョブの納期が共通である条件下で一機械あるいは二機械のみのショップにおける納期から完了時刻のずれ時間の最小化問題〔2〕や、納期内かつ納期近傍にジョブを完了させることを目的とする多品種・共通納期・一機械のロットスケジューリング問題〔3〕、フローショップ工場においてジョブを納期内かつ納期近傍に完了させ、総滞留時間最小化を目的とするジョブの作業開始時刻の設定問題〔4〕の研究が行われている。これらの研究はいずれもジョブの作業開始時刻の設定問題として取り扱われており、計画対象のモデルも全ジョブが共通納期であるという条件下や一機械のショップなどの限定された条件下であるため、現実の計画条件下での利用においては、現実規模の複雑さに対応できる方法へ修正が必要と考えられる。

現実の生産スケジューリング業務に用いるスケジューリング法としては、操業カレンダーやジョブのオーバーラッピングのような複雑な計画条件を容易に考慮できること、スケジュール作成が短時間で行えることが求められる。各種のスケジューリング法の中でシミュレーション法は、現実稼働中のシステムが存在することからみても最も実用性の高い技法と考えられる〔5〕ので、ここではシミュレーション法によるスケジューリング法を検討する。

シミュレーション法では、計画対象のジョブの工程作業を順次機械に割付けていくことによりスケジュールを生成する。機械でのつぎの工程作業が開始可能となった時点で、工程開始可能条件を満たすジョブをその機械に割付ける。ここで、工程開始可能条件とは、当該機械でのジョブの工程作業を開始してよいとする条件であり、この条件は通常、計画条件に基づいて設定される。ジョブ割付けの時点で、工程開始可能条件を満たすジョブが競合する場合には、指定している差立規則を適用してジョブ間の優先度を決定し、ジョブを選択する。なお、シミュレーションの時間進行はこのような製造工程シミュレーションにおいては、通

常、“事象間隔時間制御方式”がとられる。

ジョブの納期遅れの減少を目的とするスケジューリングに関しては、BFHS/type C法と名付けられたバックワード/フォワード・ハイブリッドシミュレーション法（BFHS法）タイプCの立案法が、差立規則を工夫した従来のフォワードシミュレーション法（FS法）に比べて、優れた性能を有することが示されている〔6〕。BFHS法は、第1段階に行うバックワードシミュレーション（BS）で得られる納期を順守するために有効な情報を、第2段階のフォワードシミュレーションに活用するスケジュール生成方式である。BFHS/type C法では、BSにより見積もられた各ワークセンタにおけるジョブの作業開始時刻の順序を、第2段階のFSにおける各ワークセンタでのジョブの割付け優先順序として用いている。しかしながら、BFHS/type C法と通常のFS法のいずれの方法においても、ジョブの完了時刻を納期に引き寄せるような機能は考慮されていない。

シミュレーション法に基づくスケジューリングにおいて納期はずれを最小にするためには、つぎの機能が不可欠である。

- （a）全ワークセンタでジョブの工程作業開始のタイミングを制御してジョブが必要以上に早く完了することを防ぎ（納期前ずれを減少させ）、同時に、ジョブの割付け優先度をジョブの完了の遅れを抑制するように決める（納期遅れを減少させる）機能。
- （b）納期前ずれと納期遅れの減少にはトレードオフの関係があるため、納期前ずれと納期遅れの和である納期はずれを最小化するスケジュールの作成を目的として、納期前ずれと納期遅れを適切にバランスさせる機能。

本論文では、両機能を備えたスケジューリング法を提案する。第1の機能（a）は、BSのジョブ割付けで生成される情報を利用して、ジョブの作業開始のタイミングの制御とジョブの割付け優先順位を決定する新しいタイプのBFHS法により実現する。第2の機能（b）に関しては、納期はずれに関連させてシミュレーションの過程を操作できる少数のパラメータを提案し、そのパラメータにより張られる空間の中でスケジュールの評価基準に関して最良スケジュールを選択する方式をとる。ここで提案する方式は、パラメータ空間探索改善法〔7〕のコンセプトを納期はずれ最小化問題に適用し、スケジュール結果の改善に効果的である新しいパラメータとシミュレーション過程の系統的な操作法を提案したことに対応する。

本論文において、2.でBSの情報を利用してFSの

過程を制御するスケジュール生成法を提案し、制御による納期はずれ減少の効果を単純ジョブショップ過程モデル上で調べる。3. では、納期前ずれと納期遅れの減少のバランスを調整し、納期はずれ最小化を行うために必要となるジョブ割付けの制御について検討する。その考察に基づき 4. において、納期前ずれと納期遅れの減少のバランスを調整するためのパラメータを導入し、納期はずれ最小化を目的とするスケジューリング法を提案する。そして、提案法の有効性の検討を、5. では単純ジョブショップ過程モデル上で、さらに 6. では現実に稼働中のスケジューリングシステムから得られた計画条件データを用いて行う。

2. スケジュール生成法

納期はずれを最小にするスケジュールを得るために前述の 2 つの機能(a), (b)が必要である。この章では、まず機能(a)の要件を満たすスケジュール生成法を提案し、スケジュール生成法に組み込んだ制御の納期はずれに対する効果を単純ジョブショップ過程モデル上で調べる。

2.1 BFHS/type D 法

スケジュール生成のためのシミュレーションは、割付け可能となった機械にジョブを順次割付けていくことによって進行する。工程開始可能条件を満足するジョブは、機械がつぎの工程作業に対して利用可能となった時点で、機械に割付けられる。このジョブの割付けの手順は以下のとおりである。

1. 工程開始可能条件を満足する（複数の）ジョブの選択
2. 選択されたジョブの優先順位の算出
3. 最も優先順位の高いジョブの当該機械への割付け

工程開始可能条件は、当該機械でジョブの工程作業を開始できるための条件であり、通常、その条件は計画条件で設定されているが、ジョブの割付けを制御して目的にかなったスケジュールを生成するため、意図的に工程開始可能条件を設定することも可能である。ここでは、意図的に設定する工程開始可能条件を“立案補助条件”と呼ぶこととする。たとえば、意図的な特定のジョブに対する工程作業の最早/最遅着手可能時刻の指定や特定機械への作業割付けの指定が立案補助条件となる。上記の手順で優先順位の算出は、通常、問題にしているスケジュールの評価基準にとって適切な差立規則を用いることによって行われる。

ジョブが必要以上に早く完了することは、立案補助条件として最早着手可能時刻を、全ワークセンタで適

切に設定することにより原理的には防ぐことができる。しかしながら、多くのジョブが互いに競合する現実のスケジューリング問題においては、それぞれのジョブに対する立案補助条件を個別に取り扱うことは実質的に不可能である。したがって、適切な最早着手可能時刻を全ワークセンタで全ジョブに対して系統的に算出できる手段が必要である。

一方、ジョブの納期遅れを減少させることは、各ワークセンタにおけるジョブの割付け優先順位の算出に適切な方法を採用することによって取り扱われてきた。BFHS/type C 法は従来利用されている差立規則を用いた FS 法に比べて、納期遅れの評価基準に対して優れた性能を有することが明らかにされている〔6〕。BFHS 法は、BS と FS を組み合わせ、BS で得られる情報を系統的に FS に利用するスケジュール生成法である。その組み合わせの中で BFHS/type C 法は、第 1 段階の BS で得られる各ワークセンタでのジョブの作業順序を、第 2 段階の FS で各ワークセンタにおけるジョブの割付け優先順序として利用する。

上述の適切な最早着手可能時刻の設定についても、ここでは BFHS 法を用いる。最早着手可能時刻を全ワークセンタで全ジョブに系統的に設定するために、BFHS 法における BS の結果から各ワークセンタにおける全てのジョブの作業開始時刻を抽出し、それらを FS のジョブの割付け制御に利用する。すなわち、BS の結果から抽出された各工程でのジョブの作業開始時刻を最早着手開始時刻として設定し、FS の段階に適用する。最早着手開始時刻をこのように設定し、差立規則は従来から利用されている規則を FS に用いる BS と FS の組み合わせ方はタイプ B と呼ばれる方法に相当する〔6〕。この方法では、BS を利用してジョブの作業開始時刻の制御が可能となる。BS の結果から得られる各ワークセンタのジョブの作業開始時刻は各ジョブが納期丁度もしくは納期内かつ納期近傍に完了するために各ワークセンタで作業を開始すべき時刻の目安となる。BFHS 法における BS の情報を利用することにより、最早作業開始時刻を系統的に算出し、FS での立案補助条件を設定する手段が具体化できる。

本論文では、納期前ずれと納期遅れをともに減少させることを目的として、タイプ B の最早着手可能時刻の設定とタイプ C の優先順序設定を組み合わせ、タイプ D と称する新たな BFHS 法（BFHS/type D 法）を提案する。BFHS/type D 法は次の 3 段階から構成される。

ステップ 1: バックワードシミュレーション

BS では生産工場のモデル上で、ジョブ割付けを時

間軸に対して逆向きに変更して操作することにより（すなわち、時間を遡ることにより）、シミュレーションが実行される。シミュレーションは未来のある時点から始めるが、通常その開始時点は、スケジューリング対象のジョブの納期の中で最も遅いものが用いられる。最も遅い納期のジョブがまず選ばれ、そのジョブの作業完了時刻が納期と一致するように、最終工程の作業が対象のワークセンタ内の機械に割付けられ、同時にその機械における作業開始時刻が求められる。時間を逆方向に進め、他のジョブについても、各ジョブの納期以前に割り付ける制約下で、最終工程の作業が割付け可能な機械に割付けられ作業開始時刻も求められる。時間を逆方向に進める過程で、いずれかのジョブの最終工程の作業が開始する時刻に到達したときには、ワークセンタ間の移送時間を考慮して、最終工程から1つ上流の工程作業の完了時刻が計算される。時間をさらに逆方向に進める過程で、上流工程の作業の完了時刻となったとき、最終工程に対して行った同様の手続きがその工程作業に対しても繰り返される。この手続きは全てのジョブの全工程作業の割付けが終了するまで繰り返される。なお、BSの過程で用いる差立規則については後述する。

ステップ2：情報の抽出

BSの結果から、全ワークセンタにおける全ジョブの作業開始時刻を抽出し、つぎの2種類の情報としてシミュレーションモデルに設定する。

- (1) 各ワークセンタにおける全てのジョブの工程作業に対する最早着手可能時刻を指定する立案補助条件（抽出した作業開始時刻を最早着手可能時刻に設定し、これを立案補助条件とする。）
- (2) 各ワークセンタにおけるジョブの割付け優先順序（抽出した作業開始時刻から得られる作業順序を割付け優先順序として設定する。具体的には、作業開始時刻の早いジョブの優先順序を高くする。）

ステップ3：フォワードシミュレーション

FSは現在の時刻（計画期間の最初の時点）から開始し、通常の時間の流れに従って、ワークセンタ内で現在仕掛けとなっているジョブを含めて計画対象の全ジョブを順次、機械に割付けていく。シミュレーションの過程において、全ての工程作業に対してステップ2の(1)で決定したジョブの最早着手可能時刻を立案補助条件として課す。さらに、ジョブを機械に割付ける過程での、各ワークセンタにおけるジョブ割付けの競合解消には、ステップ2の(2)で決定したジョブの割付け優先順序を利用する。

上記手続きのステップ1のBSの過程で、割付け可能な機械で複数のジョブが競合する場合の競合解消には納期に関連する差立規則を用いる。BSで用いる差立規則は、FSで用いるのと同様の規則であるが、時間を遡るため、本来のリリース時刻を納期とみなすなどの読み替えを行う。たとえばSLACK規則の利用では、差立時点でリリース時刻までの時間と残り加工時間の差（これはリリース時刻までの余裕時間であり、BSにおける納期余裕時間に相当する）が最小のジョブを優先する。

上記の手続きにおいて、ステップ1のBSでは、ジョブの最終工程作業はそのジョブの納期に等しいかそれ以前に割付けると暗黙に仮定している。しかしながら、この操作は、納期はずれ最小化に対して必ずしも適切な手段とは言えないため、検討の余地がある。さらに、BFHS/type D法はそれ自体は納期はずれを最小化する機能を有していないことから、この方法を利用して納期はずれを最小化する機能が別途必要となる。これらの点については後で論じる。

2.2 作業開始時刻の制御の効果

提案したスケジュール生成法BFHS/type D法は最早着手可能時刻を指定する立案補助条件を通して、各ワークセンタにおける作業開始時刻を制御する機能を備えている。ここでは、納期はずれに対するこの機能の効果を明らかにするため、この機能を有しないBFHS/type C法で生成したスケジュールとBFHS/type D法で生成したスケジュールを、単純ジョブショップ過程モデル上で比較する。

通常、制御の効果は与えられるスケジュール問題にあらかじめ設定される納期設定のきつさに関連すると考えられる。納期設定が極めてきつい場合では、ある作業が開始可能となる時刻はBSから算出した最早着手可能時刻より遅くなる傾向がある。このため、作業開始時刻を制御する立案補助条件はこの状況ではほとんど作用しないと考えられる。反対に、納期設定が極めて緩い場合には、立案補助条件は意味を持ち、各ジョブが納期に比べて必要以上に早く完了することを妨げる効果が現れると予想される。

以下では6種類の納期条件を設定し、各条件ごとに100件の単純ジョブショップ過程モデル〔8〕の計画条件データを準備する。そして、各計画条件データから生成されるスケジュールの納期はずれの平均値を比較する。

各計画条件データは5機械、24ジョブから構成する。各ジョブはランダムな経路で5つの機械を全て通過し、各機械における加工時間は1から5までの整数

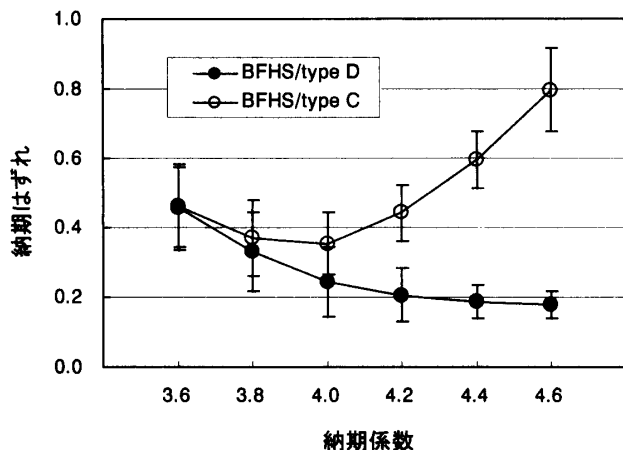


図1 最早着手可能時刻による制御の効果

の中からランダムに決定する。各ジョブのリリース時刻は時刻0で同一とし、納期の設定にはTWK法〔8〕を用い、納期係数により納期設定のきつさを決めた（ジョブの納期＝ジョブの加工時間の和×納期係数）。ここで納期係数は3.6～4.6（増分0.2）の6段階を設定し、極めてきつい場合から緩い場合の納期設定に対応させる。

図1にBFHS/type D法とBFHS/type C法によって生成されるスケジュールの納期はずれの値を示す。図1では、納期はずれを各ジョブの総加工時間の平均値と総ジョブ数によって正規化し、各納期係数における100件の計画条件データの平均値と標準偏差をそれぞれ点とエラーバーで示している。この図から、立案補助条件を用いた作業開始時刻の制御の有無によってスケジュールの納期はずれに差が生じることは明らかである。予想どおり、納期はずれに対する効果は、納期条件の設定が緩くなるにつれ顕著になっている。

以上より、納期設定が非常にきつい条件を除けば、立案補助条件を用いた作業開始時刻の制御が納期はずれ最小化に不可欠な機能であることが確かめられた。

なお、BFHS法タイプBとBFHS/type D法を比較することにより、FSにおいて最早着手可能時刻の制御を行う条件下で、従来の差立規則を用いた場合とBSの結果から抽出した優先順序を用いた場合との比較が可能である。最早着手可能時刻の制御を行わない条件下ではBSの結果から抽出した優先順序を用いた方式（BFHS/type C法）の優位性が示されている〔6〕が、同様のことがBFHS法タイプBとBFHS/type D法についても成り立ち、納期はずれ評価基準に関してBFHS/type D法が優位であることが確かめられている。

3. 納期はずれ最小化への方策と関連要因

BFHS/type D法は納期はずれの小さいスケジュールを生成する上で有効な機能を備えた方法であることを前章で示した。しかしながら、納期はずれには納期前ずれと納期遅れの2つの要因が関与しているので、個別に与えられる計画条件に対してBFHS/type D法により生成されるスケジュールが納期はずれに関して最小のスケジュールであるとは一般に言えない。したがって、1.で機能(b)として指摘した2つの要因のバランスを調整し、納期はずれに関して最適となるスケジュールを作成する必要がある。

スケジュール生成法としてBFHS/type D法を用いる場合には、納期前ずれ減少と納期遅れ減少の機能の働きを調整する方式として、BFHS/type D法のステップ3でFSのジョブ割付け過程を直接操作する方式と、ステップ1のBSを操作し、間接的にステップ3のFSでの割付け過程を操作して納期はずれ最小化を達成する方式が考えられる。BSのステップで操作するほうが各ジョブの納期との関連を扱いやすいことと、BFHS/type D法はBSの情報を系統的に活用できる特長を有することから、本論文では、後者の方式を採用する。具体的には、FSの割付け結果の納期前ずれと納期遅れのそれぞれに関連するBSの割付け結果に関する適切な評価指標を見出し、それらの評価指標に影響を及ぼす変数を系統的に操作し、間接的にFSでの納期はずれ最小化を達成する。

この章では、BSの結果をスケジュールと見なして2つの評価指標を導入し、それらと、ステップ3のFSにおける納期前ずれと納期遅れの関連について数値実験を用いて検討する。

BSによって得られるスケジュールには、通常、作業開始時刻があらかじめ設定された開始時刻（すなわち、リリース時刻）より早い時刻に割付けられるジョブが存在する。ここでは、このジョブを“過去”作業開始ジョブと呼ぶこととし、すべての過去作業開始ジョブについて、リリース時刻とBSから得られる作業開始時刻の差の平均値をBSによるスケジュールの1つの評価指標として用いる。ここでは、この評価指標を‘先頭工程の作業開始ずれ’と呼ぶこととする。

納期条件が非常にきつい場合では、‘先頭工程の作業開始ずれ’は大きいことが予想される。これは、全てのジョブが納期を守れるようにするには、それぞれのリリース時刻よりも早い時刻に、先頭工程の作業を開始する必要があるからである。しかしながら、計画条件による制約から、作業の着手をリリース時刻以前に早めることは許されない。このため、過去作業開始

ジョブの発生はステップ3で生成するスケジュールの納期遅れジョブの出現に直接関連する。このことは、ジョブの「先頭工程の作業開始ずれ」と納期遅れの指標値間に関連のあることを示唆している。

つぎに、納期前ずれと関連付けられそうな別の指標として、BSの結果における「納期はずれ」を導入する。この納期はずれは、各ジョブの納期とBSで割付けられる最終工程の作業終了時刻の差の絶対値の総和とする。以下では、この納期はずれをステップ3のFSで生成するスケジュールの納期はずれと区別するため、「B割付け納期はずれ」と呼ぶ。

過去作業開始ジョブが発生していない（納期設定が極めて緩い）極端な場合には、ステップ3のFSにおいて、すべてのジョブはリリース時刻もしくはリリース時刻より遅い時刻から先頭工程の作業を開始し、納期よりも早くもしくは納期丁度で完了することができる。この場合、BSによるスケジュールがFSのスケジュールと同一になるので、B割付け納期はずれは納期前ずれと一致する。（この一致は単純ジョブショップ過程モデル上でのみ成立する。現実の計画条件ではBSを実行するためにある種の近似条件を課す必要がある〔6〕ので、一般的にB割付け納期はずれと納期前ずれは異なる。）このことから、B割付け納期はずれの指標と納期前ずれの間に関連があると考えられる。

「先頭工程の作業開始ずれ」とB割付け納期はずれの評価指標が、それぞれ納期遅れと納期前ずれに関連しているかどうか明らかにするため、ここでは前章で用いたものと同じ単純ジョブショップ過程モデル上でこれらの関連を調べる。図2は4種の評価指標の計算値を示している。各値はそれぞれの納期係数について、100件の計画条件データから得られた値の平均値であり、図1と同様の正規化を行っている。この計算においても、BSのジョブ割付けの差立規則には

SLACKルールを用いた。

図2から、納期設定が緩くなるにつれ、納期遅れは減少し、納期前ずれは増加する傾向がみられる。「先頭工程の作業開始ずれ」と納期遅れのプロット点はほぼ平行に納期係数とともに推移する。一方、B割付け納期はずれはほぼ一定の値である。納期前ずれは、納期設定が緩やかになるにつれ、増加し、B割付け納期はずれに一致する傾向を示す。

図2では、計算対象の納期係数の範囲内で「先頭工程開始ずれ」と「B割付け納期はずれ」の大小関係が変化している。図で「先頭工程開始ずれ」が大きい納期係数の範囲ではFSではBSで得られた先頭工程作業開始時刻以降のリリース時刻（あるいはそれ以降）にジョブの割付けが行われるために、多くのジョブは納期遅れとなり「納期遅れ」が増加していると考えられる。

一方、「B割付け納期はずれ」が大きい納期係数の範囲では、「先頭工程開始ずれ」が小さいためにBSで設定された先頭工程の作業開始時刻がリリース時刻以前に設定されたジョブが存在してもその時刻の差は小さく、FSではBSで得られた割付け結果に比べて遅れて割付くジョブがあったとしてもその遅れは僅かとなり「納期遅れ」が減少していることが考えられる。その結果、「B割付け納期はずれ」の増加により「納期前ずれ」も増加する傾向が得られている。これは、緩い納期設定ではBSの割付け結果とBFHS/type D法のジョブ割付け結果がほぼ一致することを示唆している。また、納期遅れがゼロに近づくことは、納期はずれの大部分が納期前ずれによって構成されることを示唆している。納期係数4.6の場合では、計画条件データの70%程度については作業開始時刻がそれぞれの結果で一致していた。また、10%程度については先頭工程開始ずれが生じていたが、各工程のジョブの割付け順序はそれぞれの結果で一致していた。

以上の納期係数に対する依存の特徴の違いから、「先頭工程の作業開始ずれ」は納期遅れに、B割付け納期はずれは納期前ずれにそれぞれ関連していると考えてよいことがわかる。

以上の検討結果は、「先頭工程の作業開始ずれ」とB割付け納期はずれの2つの指標をBSのシミュレーション過程の適切な変数に関係させることができれば、その変数の操作により間接的にFSの納期はずれに影響を及ぼすことが可能であることを示唆している。このことは、BFHS/type D法のスケジュール生成方法において、ステップ1のBSで適切な調整が行えれば、ステップ3のFSから得られるスケジュールの納

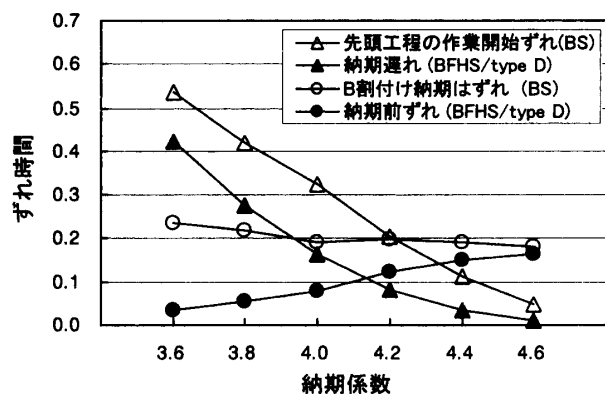


図2 BSおよびBFHS/type D法により作成されるスケジュールにおける各種の“ずれ”

期はずれ最小化が達成できることを示唆している。

4. 納期はずれ最小化を目的とするスケジューリング法

本章では、BS の過程において‘先頭工程の作業開始ずれ’と B 割付け納期はずれの 2 つの指標に直接/間接に影響を及ぼす操作可能な変数について考察し、それらの変数を系統的に操作する手段として 2 個のパラメータを導入する。さらに、そのパラメータを媒介として納期はずれに関して最良となるスケジュールを見出すスケジューリング法としてパラメータ空間上で最良解を求める手続きを提案する。

4.1 パラメータの導入と最良スケジュールの選択

BS の過程において B 割付け納期はずれの指標に影響を及ぼす操作可能な変数についてまず考察する。B 割付け納期はずれの評価値は、BS のジョブ割付け過程の最初の段階での、各ジョブの最終工程の割付け位置により決まる。したがって、最終工程の割付け位置を可能な範囲で直接操作することにより、B 割付け納期はずれの大きさを調節できる。しかしながら、各ジョブの最終工程の割付け位置を個別に操作することを考えると、操作できる変数の数はジョブ数と同じになり、それらを操作して B 割付け納期はずれを調整しながら、FS での最良スケジュールを求めることは、現実問題を対象とする場合には実質的には不可能である。ここでは、BFHS/type D 法のステップ 1 の BS で、各ジョブの納期に等しいかそれ以前としていた最終工程の割付け位置を、全体的に納期を中心として最終工程の割付けが分布し、B 割付け納期はずれが減少するような位置に系統的にシフトさせることを意図する。図 3 のガントチャートの最終工程の割付け位置の変化は、ここでの意図を模式的に示している。JOB 1 は納期以前に完了するように割付けられ、一方 JOB 2 と JOB 3 は納期よりも後に完了するように割付けられている。割付け位置をこのようにずらすこと

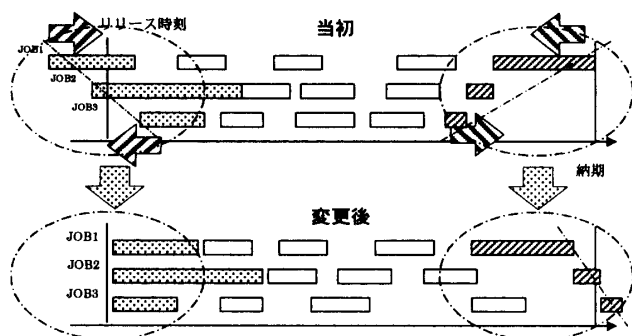


図 3 BS におけるジョブの割付け変更の模式図

により B 割付け納期はずれが小さくなることを見て取れる（この図ではリリース時刻と納期はそれぞれ全ジョブで同一であるとしている）。

具体的には、一度 BS を実行し、その結果から算出した B 割付け納期はずれを用いて、BFHS/type D 法の第 1 ステップの BS において、各ジョブの納期はずれの B 割付け納期はずれからのずれ量に比例した時間だけ割付け開始可能時刻をシフトする。（BS では、シフトした時刻またはそれ以前に最終工程を割付ける。）BS におけるジョブ j に対する割付け開始可能時刻のシフト量 S_j は次式により決めることにする。

$$S_j = c_d(d_j - C_j^B - B) \quad (1)$$

ここで、 d_j はジョブ j の納期であり、 C_j^B 、 B は一度実行した BS によるジョブ割付け結果から算出されるジョブ j の完了時刻、B 割付け納期はずれをそれぞれ示す。この式では、各ジョブに共通の比例係数 c_d を設定しているが、この係数の大きさにより、B 割付け納期はずれの大きさを直接操作することができると考えられるので、これを B 割付け納期はずれ（および関連する FS での納期前ずれ）の大きさを操作するパラメータとみなすことにする。

一方、‘先頭工程の作業開始ずれ’に関しては、BS でのジョブ割付けの最終段階の操作において先頭工程の割付けが決まるので、B 割付け納期はずれのように直接的に指標値を操作することは不可能である。ここでは、‘先頭工程の作業開始ずれ’を間接的に操作する方法として、BFHS/type D 法の第 1 ステップの BS のジョブ割付けの過程で、ジョブの割付け優先順位を算出するのに用いる納期余裕時間を、一度実行した BS の割付け結果の‘先頭工程の作業開始ずれ’に関係させて系統的に変更し、間接的に‘先頭工程の作業開始ずれ’（および関連する FS での納期遅れ）を操作することにする（図 3 の左側の先頭工程の割付け位置の変化は、ここでの意図を模式的に示している。なお、納期余裕時間とは通常、BS 実行時におけるある時点から納期までの時間と残りの加工時間の差として求められる時間である）。

具体的には、納期余裕時間の変更は‘先頭工程の作業開始ずれ’に比例する時間を設定する。BS におけるジョブ j に対する納期余裕時間の変更量 Δ_j は次式により決める。

$$\Delta_j = c_r(O_j^B - r_j) \quad (2)$$

ここで、 r_j はジョブ j のリリース時刻であり、 O_j^B は一度実行した BS によるジョブ割付け結果におけるジョブ j の先頭工程の作業開始時刻である。比例係数 c_r は、間接的に先頭工程の作業開始ずれ（および関連する FS での納期遅れ）の大きさを操作するパラメ

ータとみなすことにする。式(2)の導入により、BSのジョブ割付けにおいて先頭工程の作業開始ずれが大きいジョブを早く割付ける操作を行える。

以上の2個のパラメータを導入することにより、納期前ずれと納期遅れを間接的に操作することが可能となると考えられる。すなわち、2個のパラメータ c_d , c_r の値を決め、ステップ1のBSにそれに応じた変更を加えたBFHS/type D法を用いると、パラメータの値を反映したスケジュールを生成することが可能となる。

4.2 スケジューリング手順

納期前ずれと納期遅れを間接的に操作することが可能と考えられる上述の2個のパラメータを用いて、納期はずれ最小化を目的とするスケジュール作成法を提案する。ここではパラメータ空間探索改善法〔7〕の方式を用いて最適スケジュールを作成する。すなわち、パラメータ c_d , c_r の直積によって張られるパラメータ空間を設定し、パラメータ空間上で最良のスケジュールを選択することにより、納期はずれ最小のスケジュールを作成する。

提案するスケジュール作成法の具体的な手順は以下のとおりである。

手順1：BSの実行とパラメータによるジョブ割付け操作に用いる諸数値の決定

与えられた計画条件に従ってBSを実行する。ジョブの最終工程はそのジョブの納期に等しいかそれ以前に割付ける。

得られたジョブ割付け結果からB割付け納期はずれ B 、ジョブ j の先頭工程の作業開始時刻 O_j^B と完了時刻 C_j^B を求める。

手順2：パラメータ空間の設定

BFHS/type D法のステップ1のBSにおける最終工程の割付け開始可能時刻のシフトと納期余裕時間の変更量を決める際のそれぞれ大きさを決めるパラメータ c_d と c_r を導入する。

各パラメータについて、最小値と最大値および増分を設定する。最小値として-1.0、最大値として1.0、増分として0.2の値を用いる。

手順3：スケジュール生成

BFHS/type D法を用いて、パラメータの全ての値の対についてスケジュールを生成する。

BFHS/type D法のステップ1のBSの実行過程においては、各ジョブの最終工程の割付け開始可能時刻を(1)式の S_j だけシフトさせ、ジョブの優先度を算出する際に納期余裕時間を(2)式の Δ_j だけ変更する。

手順4：最良解の選択

手順3で生成した複数のスケジュールから納期はずれが最小であるスケジュールを選択する。もし、パラメータの値の再設定により、より良い解が得られそうであることが生成したスケジュールの集合から推測される場合には、パラメータの変域の拡大や増分の縮小を行い、手順3に戻る。

上記手順では、パラメータ空間上で納期はずれに関して最良のスケジュールを見つけるために、列挙法を採用している。列挙法は列挙に必要な時間がそれほど大きくなければ、実用的で簡便な方法である。また手順3での設定パラメータ値の吟味には、生成されたスケジュールから算出した納期はずれ値のパラメータ空間上での曲面形状をみることも有効である。

手順4におけるパラメータの値の再設定を行う場合には、最良解が得られるパラメータ組みがパラメータ空間の外周部に位置する場合ではパラメータ空間を広げる処理を行い、また、最良解が得られるパラメータ組みが空間内分布のピーク近傍に位置することが予想される場合は部分的に刻みを細かくするなどの処理を行う。

5. 単純化ジョブショップ過程モデル上での評価

5.1 差立規則の影響

スケジュール生成に用いるBFHS/type D法はステップ1のBSのジョブ割付けにおいて差立規則を用いるため、最終的に得られるスケジュールは差立規則に依存する。提案法の納期はずれ最小化に対する効果を調べる前に、差立規則の違いによる影響をまず検討する。ここでは、通常のSLACKルールと、その対極にある“納期余裕時間最大のジョブを優先する”規則(以下LSLACKルールと呼ぶ)を用いて、差立規則の違いによる納期はずれ最小化への効果を2.2および3.で利用した単純ジョブショップ過程モデル上で調べる。なお、BSにおける納期余裕時間(スラック値)は、BSの過程での差立時点で、BSでは納期とみなされるリリース時刻間までの時間幅から割付けが未完了の総加工時間を引いた値とする。

以下の検討では、2.1で提案したBFHS/type D法を単純に適用して求めたスケジュール(以下‘当初’スケジュールと呼ぶ)と、4.2で提案したスケジュール手順を適用して求めた納期はずれに関して最小となるスケジュール(以下‘最良’スケジュールと呼ぶ)を、各差立規則を用いた場合について比較する。なお4.2のスケジュール手順の適用に際して、パラメータの設定は、 c_d と c_r の値を-1.0~1.0(増分0.2)にとり計121組の格子点をパラメータ空間上に設定した。

当初スケジュールと最良スケジュールをSLACK

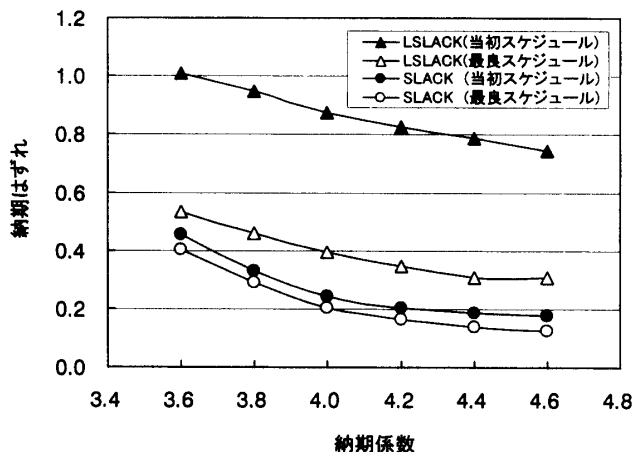


図4 納期はずれの差立規則による違い

または LSLACK を差立規則として求め、それらのスケジュールから算出した納期はずれを図4に示す。プロット値は、各納期係数における計画データ100件についての平均値である。まず、LSLACK ルールの適用時の方が、パラメータの導入による納期はずれ最小化への効果は大きいことがわかる。しかしながら、SLACK ルール適用時の当初スケジュールと最良スケジュールが示す納期はずれは、両者とも LSLACK ルール適用時の最良スケジュールよりも全ての納期設定のきつきにおいて優れている。より詳細にみるため、各計画条件データに対して得られるスケジュールを個別に比較すると、SLACK ルールを用いて得られる最良スケジュールの納期はずれは、LSLACK ルールを用いて得られる結果に比べて、納期設定が極めてきつい場合の計画条件データ数件を除いた全ての計画条件データにおいて優れていることがわかった。

この結果から、差立規則によらず納期はずれ最小化の効果が4.2のスケジュール手順によって得られていること、さらに、当初スケジュールですでに良好なスケジュールが得られる SLACK ルールにおいては、当初スケジュールから最良スケジュールへの納期はずれ評価値の改善幅は小さいが、納期はずれのさらに小さいスケジュールが得られることがわかる。これらのことから、本論文では以下の評価において BS のジョブ割付けの差立規則として SLACK ルールを用いる。

5.2 パラメータ導入による納期はずれ最小化に対する効果

本節では、BFHS/type D 法を組み込んだスケジューリング手順の有効性を前節と同一の単純化ジョブショップ過程モデル上で調べ、納期設定のきつきに対する提案法の特徴を考察する。納期前ずれを制御する機

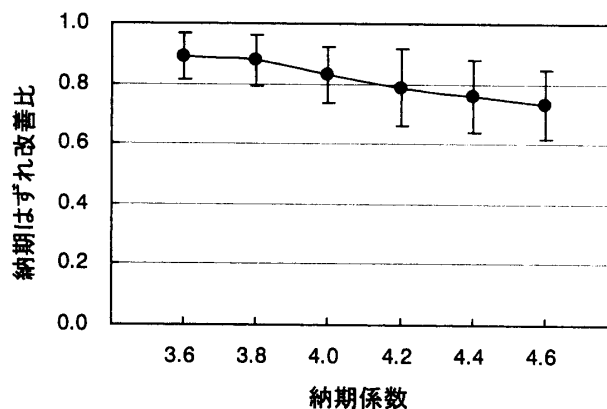


図5 納期はずれ改善比の平均と標準偏差

能を有していない従来のスケジューリング方式との比較は、以前に示した図1からもわかるように、提案方式は、極めて納期設定がきつい条件を除けば、従来の方式より納期はずれの評価値に関しては優れていることは明らかである。このことから、評価はパラメータ導入による納期はずれ最小化への効果を調べることとし、当初スケジュールと最良スケジュールを比較する。ここでは、各計画条件データについて、最良スケジュールと当初スケジュールの納期はずれの比（以下“納期はずれ改善比”と呼ぶ）を各納期係数ごとに評価する。

図5に各納期係数に対する納期はずれ改善比を示す。図中の点は各納期係数における計画データ100件の値の平均であり、エラーバーは標準偏差を示す。この図から、納期係数の増加に対して、納期はずれ改善比が減少する傾向がわかり、ほぼ全納期係数で納期はずれの2割程度の減少が得られている。これより、パラメータを導入してジョブ割付け操作を行う提案法は、納期はずれ最小化にとって納期設定のきつきにかかわらず有効であることがわかった。

6. 現実の計画条件データによる提案法の評価

現実の工場では、機械数や取扱いジョブ数、ジョブあたりの工程数が多いため計画データの規模は通常大きく、ジョブの納期設定も納期係数を求めるとジョブごとに異なっているのが普通であり、さらに機械ごとに稼働予定（操業カレンダー）が設定されているなど計画条件は複雑である。したがって、提案法の適用可能性と有効性を示すためには、単純化ジョブショップ過程モデル上での評価だけでなく複雑な計画条件が設定されている現実規模の問題においても評価を行う必要がある。

本章ではジョブショップ型生産形態をとっている機械加工工場で現実に稼働中のスケジューリングシステ

ム〔9〕で過去約4年間にこのシステムで使われた50件の計画条件データを利用して提案法を評価する。一計画条件データは、1.5～2.0カ月間が計画対象期間であり、計画立案時点での工場内仕掛けジョブ、操業カレンダー、およびジョブの搬送時間や段取り時間、ジョブのオーバーラッピングも考慮している。一計画データに含まれるジョブの数は94～285であり、各ジョブのリリース時刻と納期は上位計画部門によりあらかじめ定められている。納期係数を算出すると、それらはジョブにより異なるが、0～80の範囲の値を取り、大部分のジョブは0.5～45の範囲に入る。

考慮すべき計画条件は以上のように複雑であるが、これらはシミュレーションモデルにて考慮されるので、スケジュール作成の手順は変更する必要はない。パラメータ c_d と c_r の値も単純化ジョブショップ過程モデルの場合と同様に-1.0～1.0（増分0.2）として、全121組からなる格子点をパラメータ空間上に設定した。

単純化ジョブショップ過程モデルの場合と同様の理由により、当初スケジュールと最良スケジュールを比較して、パラメータ導入による納期はずれ最小化への効果を調べる。図6は、納期はずれ改善比が横軸に示す範囲内の値をとる計画条件データの割合を示す。納期はずれの改善比が0.7～0.9程度である計画条件データが多く、全計画データについての納期はずれ改善比の平均は0.78であった。これより、現実の計画条件においても、単純化ジョブショップ過程モデルと同程度のパラメータの導入による納期はずれ最小化の効果が認められた。

以上の検討から、提案方式は現実の計画条件に対しても納期はずれ最小化を目的とするスケジューリング法として有効であることが示された。なお、現実の計画条件データで最良スケジュールを得るために、CPUがPentium II 450 MHzのパーソナル・コンピュータを用いて一計画条件データに対し約5分を費や

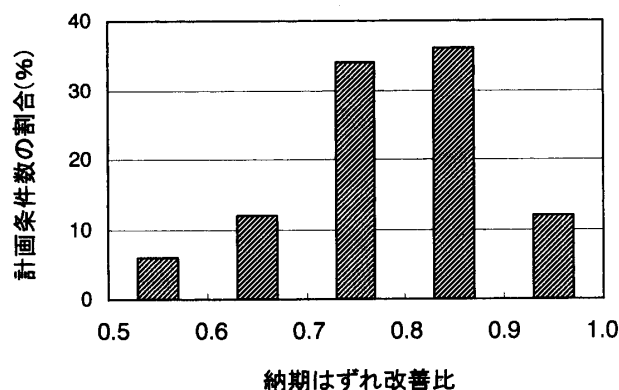


図6 現実の計画条件データにおける納期はずれ改善比

した。これは現実の業務において実用上支障のない範囲と考えられる。

7. ま と め

本研究では、納期関連評価指標として、納期はずれを取り上げて、納期はずれ最小化を目的とするシミュレーションベースの生産スケジューリング法を提案し、その有効性を単純化ジョブショップ過程モデルだけではなく、現実の計画条件データについて検証した。提案方法は、BFHS/type D法をスケジュール生成方法として、パラメータによるジョブ割付け操作によって最良スケジュールを探索する方法である。

方法の提案にあたり、BFHS/type D法におけるBSから得られるずれ情報、つまり‘先頭工程の作業開始ずれ’とB割付け納期はずれが納期はずれに関連する指標であること示し、それらの特性を明らかにした。その考察に基づき、BSにおいてそれらの指標を系統的に操作し、FSから得られるスケジュールで納期はずれが最小となるスケジュールを見出すためのパラメータ空間とスケジューリングの手順を提案した。

提案方法は納期関連評価指標値の最適化にとって汎用性のある方法と考えられる。本論文では“納期はずれ”の評価基準に対して、その有効性を検討した。なお、納期遅れと納期前ずれに重みを付けて定義される重み付き納期はずれの最小化問題については今後の課題であり、さらにより一般性の高い納期関連評価基準を取り入れた形で発展させていきたい。

参 考 文 献

- [1] Conway, R. W., Maxwell, W. L. and Miller, L. W. (関根知明監訳):「スケジューリングの理論」, 日刊工業新聞社, pp. 16-20 (1971)
- [2] John J. K.: “Minimizing the Average Deviation of Job Completion Times about a Common Due Date”, *Naval Research Logistics*, Vol. 28, No. 4, pp. 643-651 (1981)
- [3] ハリム・アブドル・ハキム, 宮崎茂次, 太田 宏: “ジャストインタイム方式における多品種・共通納期・一機械ロットスケジューリング問題の解法”, 日本経営工学会誌, Vol. 43, No. 2, pp. 111-116 (1992)
- [4] カオタマチャイ・ルアンサック, 柳川佳也, 宮崎茂次: “JIT/FMS環境へのバックワードスケジューリングルールの適用”, 日本機械学会論文誌 (C編), Vol. 62, No. 600, pp. 431-437 (1996)
- [5] 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)
- [6] 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)
- [7] 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)
- [8] Conway, R. W., Maxwell, W. L. and Miller, L. W. (関根知明監訳): 「スケジューリングの理論」, 日刊工業新聞社, pp. 328-341 (1971)
- [9] 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)