クリティカルパス解析による並行多重プロジェクトの工期調整方式

正員 杉原弘章 (三菱電機株式会社 名古屋製作所)

A Method of Execution Time Adjustment in Parallel Projects
Based on Critical Path Analysis

Hiroaki Sugihara, Member (Mitsubishi Electric Corporation)

It becomes very important that the potential delays in the delivery dates are estimated as early as possible and the adjustments to the production periods are applied as little as possible only to the higher priority items in order to maximize the effectiveness. However, just like planning the most optimized schedules on the job shop production floors, quantitative decision making on load change actions has been a very difficult problem. Thus, in order to solve such problems, we have proposed CSM (Concurrent Scheduling Method) as a means to plan schedules. Under CSM, the optimum schedule is planned to maintain the delivery dates while solving resource conflicts. In this article, a new technique is proposed in order to adjust production periods of projects (to be called as concurrent projects, hereafter), which share resources and are processed concurrently by investigating the established critical paths while a function is added to CSM.

キーワード： クリティカルパス、多重PERT、ジョブショップ、スケジューリング、工程管理

Keywords: critical path, multi-PERT, job shop, scheduling, production process schedule control

1. まえがき

製造業における製造現場では、現有リソースを極限状態で使用しながら、少しでも多くの受注を納期までに完成させることが強く求められている。このような製造現場では受注対応でオーダと称する製造命令が出される。現有リソースを極限状態で使用してより多くのオーダを処理しようとする場合、ややもするといくつかのオーダは納期遅延となってしまう。このため、納期遅延をできるだけ早い時期に予測し、できる限り最小限の工期調整を重点的にを行い最大の効果をあげることが重要になる。ここで工期調整とは製作完了予定日と納期との関係を調整することである。たとえばジョブショップの製造現場では、工期調整として、残業・休日出勤・一部外注化などの負荷対策、工程設計の見なおし、納期交渉による納期変更などが行われるが、負荷対策が主体となる。ところが、負荷対策を定量的に決定することは、ジョブショップの製造現場における最適な日程計画立案の困難さと同様、非常にむづかしい問題であった。

現有リソースを極限状態で使用してもなお納期遅延が発

生するかどうかを予測するためには、最適な設備運用をめざした日程計画の立案が前提となる。ところが、多くのジョブショップの製造現場のように複数種類の部品がいくつもの工程を渡りながら加工され、最終的に製品として組立てられるような場合は、製品の製造時における要素作業としてのジョブの構成は複雑になる。このような場合は、日程計画立案時にリソースの競合問題がとりわけ頻繁に発生し、計画立案を困難にしていた⁽¹⁾⁽²⁾。

そこで、このような問題を解決するため、日程計画立案の手段として、我々はリソース競合問題を解決しながら納期順守をめざした最適な日程計画を立案するCSM (Concurrent Scheduling Method) を提案した⁽³⁾。CSMは、オーダごとのジョブ構成、つまり必要な要素作業としてのジョブの工程の種類、相互関係、工数などを確定し、すでに着手しているオーダについては各々のジョブ構成上で進捗を把握する。このように把握した個々のオーダのジョブ構成を多重化して、時系列にそってリソースごとの日程計画を立案する。ここでジョブ構成の多重化とはジョブ構成図を重ねあわせた状態を想定し、ジョブ構成図間のリソース競合を考慮しながら

ら全体として同じ1本の時間軸で処理が進む状態をいう。この多重化によりリソースの最適な運用をめざした日程計画立案が容易に行えるようになるとともに、納期予測、負荷推移予測なども可能になった。

しかしながら、納期遅延が予測される場合、最適な負荷対策を見出せないという課題が残った。いいかえると負荷対策を見出す場合、CSMによる日程計画立案で得られた負荷グラフなどをもとに、納期遅延の要因を推定し、負荷対策を試行錯誤で探し出しているため無駄な負荷対策も含めてしまうので、負荷対策の最適化が課題として残った。

この論文ではこの課題を解決するため、CSMに機能を追加し、CSMで把握したクリティカルパスの究明により、リソースを共用しながら並行して処理されるプロジェクト（以下、並行多重プロジェクトと称す）の工期を調整する方式を提案する。この方式によれば、より無駄の少ない負荷対策を得ることが可能になる。本方式をジョブショップ生産の製造現場の工期調整に適用し有効性を確認した。

本稿では、2章で従来の工期調整方式とその課題について述べ、3章で工期調整方式を提案する。4章でその評価について論じ、考察を行う。

2. 工期調整における課題

日程計画において納期遅延が予測される場合、計画段階で工期調整を行い、日程計画上の納期遅延を解消しておかなければならない。従来、プロジェクトの工期調整を行う方法としては、たとえばPERT(Program Evaluation and Review Technique)やTOC(Theory Of Constraints)があった。

PERTでは工期調整はクリティカルパスに対して行われる。クリティカルパスは、始点から終点まで連続して連なり、プロジェクトの工期をきめるパスとして表される。このプロジェクト全体の工期を短縮する場合、クリティカルパス上のアクティビティに対し対策を行っていた。単一プロジェクトの場合、この手法は大きな偉力を発揮したが、複数のプロジェクトがリソースを共用⁽⁴⁾しながら処理されるときに発生する競合に関する問題を扱う機能は含まれていなかった。また、複数プロジェクトにまたがるクリティカルパスに関しても同様に含まれていなかった。これはもともとPERTは単一プロジェクトの計画管理手法として生まれたためである。

クリティカルパスについては、その多様性に着目した研究が報告されている⁽⁵⁾。ところがジョブショップの製造現場での納期対策への適用という面からのアプローチではないため、納期遅延を解消するための負荷対策の定量的な解析についての機能は含んでいなかった。

TOCではリソース競合問題を解決する方法が提案されていて、TOC理論により納期短縮が可能であることが報告されている⁽⁶⁾。すなわち、図1に示すようなクリティカルパスとボトルネックリソースを組合せたクリティカルチェーンがプロジェクト全体の納期順守の制約条件になるとしている。工期調整はこのクリティカルチェーンに対し行う。この図において四角形はジョブを示し細い矢線はジョブの実行

順序を示している。競合するリソースを使うジョブ、たとえば、図1ではBで示されるジョブは同一時間帯に重ならないようにずらしている。このため、クリティカルパスとはちがった線をひく必要がある。これをクリティカルチェーンと称している。この方法では、ボトルネックリソースが単数でなかったり、クリティカルチェーンが日によって異なることもあるようなジョブショップの製造現場では適用が困難であった。また、日々変化の多いジョブショップの製造現場において、計画で納期遅延が予測される場合、負荷対策の詳細については対象とされていない。

このほか、多重プロジェクトの計画に関する全体的な解析についての報告⁽⁷⁾や、負荷計画とスケジューリングの統合についての報告⁽⁸⁾などがある。これらはいずれもプロジェクト計画に関する最適化技術の応用であるが、ジョブショップの製造現場における日程計画上の納期遅延予測時の負荷対策は含まれない。

このように従来の手法は目的が異なるため、複数プロジェクトがリソースを共用しながら並行して処理されるジョブショップの製造現場における日程計画や負荷対策の解析には適さないと考えられる。CSMはこのような日々変化の多い製造現場において計画納期遅延が予測される場合、計画管理者が負荷グラフなどを見ながら試行錯誤ではあるが負荷対策を検討しやすくするものである。

CSMではオーダをそれぞれひとつのプロジェクトとみなし、並行多重プロジェクトを対象として製造現場を管理する。CSMはすべてのプロジェクトの納期順守をめざし、最適な設備運用による日程計画を立案する。これにそって製造現場では作業が進められる。したがって納期遅延が発生するかどうかは日程計画立案時に予測できる。納期遅延が予測される場合、日程計画に含まれるクリティカルパスを調べ、負荷対策に結びつける。

ただし、従来、クリティカルパスは日程計画上の余裕日数がなくなることにより検出していた。クリティカルパスは実際にはもっと早い時点に発生し、段階的に余裕日数が減ってついには余裕日数がなくなる。したがってクリティカルパスのはじめの段階で検出できるなら調整可能期間全体にわた

図1 TOCのクリティカル・チェーン

Fig.1. Critical Chain in TOC

って対策ができることになる。これができなかったため、クリティカルパスは部分的にしか検出しないで負荷対策を行っていたという問題があった。

3. 並行多重プロジェクトの工期調整方式の提案

CSMでは従来、クリティカルパスを余裕日数がなくなるタイミングから検出していた。本論文ではもっと早いタイミング、すなわちはじめにあった余裕日数が減少しはじめるタイミングによりクリティカルパスを検出し、工期調整を行う期間をきめる方法を提案する。リソースを共用しながら複数のオーダを処理する場合、オーダが混みあってくると各オーダの完成までの期間は長くなってしまふ。これはジョブのリソースでの競合が多くなり、待たされる時間がふえるからである。リソースの競合が発生するとき、処理されるひとつの部品以外の待たされる部品ははじめにあった余裕を減少させながら処理される順番を待つが、これを余裕消費という。はじめに余裕のある部品でも余裕消費により次第に余裕がなくなり、余裕消費の累積値が当初の余裕を越えるとその部品の属するオーダは納期遅延となる。

ここではまず並行多重プロジェクトのクリティカルパスについて述べたあと、このクリティカルパスによる工期調整について述べる。

<3.1>並行多重プロジェクトのクリティカルパス 一般的に、クリティカルパスはプロジェクト全体を運命づけるパスであるといえる。

PERTでは、クリティカルパスはプロジェクトの工期（始点から終点までの期間）を決めるパスと定義される。すなわち与えられる各ジョブ（アクティビティ）の所要工数とジョブ処理の相互関係を表すネットワーク図からクリティカルパスがきまり、工期がきまる。工期をいかにして短縮するか、あるいは工期を計画どおりに実現するときどこを重点的に管理するか、ということがPERTの関心事であり、クリティカルパスは重要である。

一方、ジョブショップの製造現場では各プロジェクト（オーダ）の工期は、与えられる納期からきめられ、遅れることは絶対許されない。そのため、CSMでは与えられた納期が守れるか、もし守れないならなにが原因か、対策はなにかということが重大な関心事となる。したがって、CSMにおけるクリティカルパスは「納期遅延を発生させるパス」とする。すなわち、すべてのオーダの納期を守るためにクリティカルなパスという意味である。

CSMではクリティカルパスを次の3種類に分類する。

- ・トラディショナルクリティカルパス
- ・主クリティカルパス
- ・従属クリティカルパス

これらを図2により説明する。詳細な説明に入る前に図2（a）ではこれらの説明に用いる用語の説明を行う。図においてひとつのオーダの処理手順をジョブボックスとオーダ内コネクタであらわした図をプロセスチャートという。ここでジョブボックスとは要素作業としてのジョブを示し、オー

ダ内コネクタとは部品毎の処理手順や組付け加工時の関係を表す矢線である。オーダ内コネクタで結ぶこれらの一連のパスをオーダ内パス（PWO：Path Within Order）と呼ぶ。これらは工程設計の段階に決められる。図2（a）ではたとえば結合点 P_{01} から P_{06} に続く細い実線がオーダ内パスである。なお、プロセスチャート内でジョブボックスとジョブボックスが結ばれるオーダ内コネクタ上の点及び始点・終点を結合点という。結合点には結合点番号がつけられる。

ジョブボックスからは他の種類の矢線、すなわちリソース内コネクタも連なっている。リソース内コネクタは同じリソースを用いて処理される他のジョブボックスと結ばれ、リソースにおける処理の順序関係を示す。これは日程計画の段階に決められる。リソース内コネクタで結ぶ場合は他のプロセスチャートにまたがっても差し支えない。リソース内コネクタで結ぶこれらのパスをリソース内パス（PWR：Path Within Resource）と呼ぶ。このリソース内パスの例を結合点 P_{06} から P_{07} に続く細い点線で示す。

プロセスチャート上では各工程は手順の名称をつける。各工程における実際の処理は各工程のリソースで行われ、処理待ちもリソース対応で発生する。このため競合に関する議論はこれ以降はリソースについて行う。図2（b）には工程とリソースとの対応例を示す。この図によると、たとえば手順としての工程FはリソースF1で処理される。これらの準備のもとに3種類のクリティカルパスを説明する。

図2（c）ではトラディショナルクリティカルパスを示す。トラディショナルクリティカルパスはオーダの処理期間として必要な最小限の期間すら与えられないときに現れ、単独処理を想定しても納期までに処理できないパスを表す。オーダ内パスに現われる。これは日程計画に入る前の工程設計の段階で明確になる。最遅日程や余裕を算出したとき、余裕がマイナスのパスとして把握できる。ここで余裕とはオーダを単独で処理する場合を想定して、納期からどれくらい早く完成できるかをいう。トラディショナルクリティカルパスが発生する場合は、処理期間が短かすぎるので計画立案するまでもなく納期遅延が発生するが、データ上は始点つまり第一工程着手時にすでに余裕がマイナスとなる。負荷対策などを加えない限りこの状態の回復はありえないので、余裕のない状態は終点まで連続する。図2（c）の例では P_{11} から P_{19} がトラディショナルクリティカルパスとなる。トラディショナルクリティカルパスが発生するとき、同じジョブ構成をPERT図であらわすとPERT図においてクリティカルパスとなる部分は少なくともプロセスチャート上ではトラディショナルクリティカルパスとなる。なぜなら最も所要期間が長いパスを示しているからである。

トラディショナルクリティカルパスが発生している状態で日程計画を立案すると、少なくともそのオーダは必ず納期遅延となり他のオーダにも影響を与えるので、なんらかの処置を行って解消してから他のオーダとともに日程計画を立案する。

つぎに図2（d）に主クリティカルパスと従属クリティカ

図2 CSMのクリティカルパス

Fig.2. Critical Paths In CSM

ルパスを示し説明する。図2 (d) の例では工程CのリソースC1でジョブの渋滞が発生していることを示している。リソース内パスのうち P_{21} から P_{22} 、 P_{23} 、 P_{24} を経由して P_{25} にいたる太線で示される部分が主クリティカルパスである。

主クリティカルパスはリソース内パスのうち納期遅延の直接の原因となる一連の部分である。リソースの競合で起きるジョブの渋滞により発生する。これは日程計画によって明確になる。

従属クリティカルパスは主クリティカルパスでのジョブの渋滞をきっかけとして発生するパスで、結果的には納期遅延に導くオーダ内パスの一部である。主クリティカルパスに属するジョブボックスを起点として、これに続く終点までの

オーダ内パスが従属クリティカルパスとなる。従属クリティカルパスも日程計画によって明確になる。

図2 (d) の例では工程CのリソースC1におけるジョブの渋滞により主クリティカルパスが発生していて、これに続くオーダ内パスが従属クリティカルパスとなっている。従属クリティカルパスはこの例ではオーダ n 、 $n+1$ 、 $n+3$ で発生していて、オーダ $n+2$ では発生していない。一例としてオーダ n のプロセスチャートにおいて、結合点 P_{22} から P_{39} に続くパスは従属クリティカルパスである。このように従属クリティカルパスと主クリティカルパスは必ず関連しながら現われ、主クリティカルパスは他のオーダの従属クリティカルパスにも連なることが多い。これらのオーダが主クリテ

イカルパスを介して、たがいに完了日について影響を与え合うことをあらわしている。

<3.2> クリティカルパス解析 ジョブショップの製造現場ではクリティカルパスはオーダが納期遅延となる場合に現れるが、納期遅延の原因はクリティカルパスを調べることで明確になる。ここでは、納期遅延が発生するとき、クリティカルパスの解析をもとに工期調整を行い、最終的には納期遅延を解消した日程計画立案をめざす。この方式を図3に示す。図中、四角形で示されるブロックは各ステップで実施されることがを表し、矢線は各ステップの実行順を示す。

図においてクリティカルパス解析による工期調整は工程設計の段階と日程計画の段階とにわかれる。工程設計の段階ではトラディショナルクリティカルパスに基づいて処理し、日程計画の段階では主クリティカルパスと従属クリティカルパスに基づいて処理する。

(1) トラディショナルクリティカルパスの解析 図3において工程設計の段階ではトラディショナルクリティカルパスの解析を行う。トラディショナルクリティカルパスは、ジョブ構成を確定した後、他のオーダがない状態でそのオーダだけを単独処理する場合を想定し、ジョブごとの余裕を算出することにより検出できる。この場合、オーダ間やオーダ内のリソースの競合は考慮しない。ジョブごとの余裕はジョブごとの納期順守最遅開始時刻から算出される。納期順守最遅開始時刻とは、単独で処理される場合を想定したとき納期順守できる最遅開始時刻である。また、同様に単独処理を想定した場合、オーダの着手日からさまるジョブごとの最早の開始日程を最早開始時刻という。これらを結合点についていう場合は結合点時刻という。

オーダ A の目標完成日を P_A とすると、ジョブ間の結合

点 i における最早結合点時刻 t_i^E 、納期順守最遅結合点時刻 t_i^N は次式で表すことができる。ここで結合点 0 は始点、結合点 n は終点を意味する。結合点 k から結合点 i へのジョブをジョブ (k, i) とする。 $k < i$ である。オーダ A のジョブ構成に属するジョブの集合を JA とすると、 $(k, i) \in JA$ はジョブ (k, i) がオーダ A のジョブ構成に属することを表す。また、 D_{ki} はジョブ (k, i) の所要時間を表す。

$$t_0^E = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$t_i^E = \max_{(k,i) \in JA} (t_k^E + D_{ki}) \quad \dots\dots\dots (2) \quad (i=1, \dots, n)$$

$$t_n^N = P_A \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$t_i^N = \min_{(i,j) \in JA} (t_j^N + D_{ij}) \quad \dots\dots\dots (4) \quad (i=n-1, \dots, 0)$$

(1) 式で結合点 0 の最早結合点時刻をきめたあと、(2) 式で結合点 1 について算出し、順次、結合点 $2, 3, \dots, n$ と進めて全点の最早結合点時刻を算出することができる。同様に結合点 n の納期順守最遅結合点時刻を(3) 式できめ、順次、結合点 $n-1, n-2, \dots, 0$ と進めて全点について算出することができる。

ジョブ (i, j) の最早開始時刻 ES_{ij} 、最早終了時刻 EF_{ij} 、納期順守最遅開始時刻 NS_{ij} 、納期順守最遅終了時刻 NF_{ij} は各々次のようになる。

図3 並行多重プロジェクトの工期調整方式
Fig. 3. A Method of Execution Time Adjustment in Parallel Projects

$$ES_{ij} = t_i^E \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$EF_{ij} = t_i^E + D_{ij} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$NS_{ij} = t_j^N - D_{ij} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$NF_{ij} = t_j^N \quad \dots\dots\dots (8)$$

納期順守余裕時間 DF_{ij} はつぎようになる。

$$\begin{aligned} DF_{ij} &= t_j^N - (t_i^E + D_{ij}) \\ &= NF_{ij} - EF_{ij} \quad \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

トラディショナルクリティカルパスが発生する場合、このパス上では、

$$DF_{ij} < 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

となる。そして、先頭工程の最遅着手日時が計画開始日時より前となる。つまり、各部品における始点（第一工程）においてすでに余裕がないとき、その始点から終点までトラディショナルクリティカルパスが続くことを示している。トラディショナルクリティカルパスが発生する場合、日程計画に組込む前の段階で消えるような処置、たとえば、再度さらに工期を短縮するような工程設計を試みるか、納期交渉または営業政策により納期を変更するなど対策を行い、すべてのトラディショナルクリティカルパスを解消しなければならない。そして、日程計画は対象となるすべてのオーダーにおいてトラディショナルクリティカルパスがない状態で立案する。

(2) 主クリティカルパス、従属クリティカルパスの

解析 図3において日程計画の段階では主

クリティカルパスと従属クリティカルパスに基づき解析を行う。実際に負荷調整を行うのはおもに主クリティカルパス上であり、結果として負荷対策の効果が現れるのは従属クリティカルパスである。

日程計画の段階までにトラディショナルクリティカルパスはすべて解消させておくので、各部品はプロセスチャート上の始点では余裕を有する。工程が進むにつれて混み合うリソースで処理されるジョブでは処理待ちが発生し、余裕は消費される。納期遅延となるオーダーでは余裕消費ジョブから納期を越えて終点につながるパスはすべて従属クリティカルパスである。ただし、フリーフロートのあるパスではそれだけ差し引いて考慮される。ここでフリーフロートとはCSMでは組付け加工の手前で組付け他部品待ちとなるときに余裕をいう。フリーフロートはPERTではジョブ構成が決まるとともに一意的に決まる。一方、CSMでは工程設計でジョブ構成が決まっても他のオーダーとのリソースの競合はきまらないのでフリーフロートは決まらず、日程計画の立案ではじめて決まる。計画を立て直す毎に値が変わる。たとえばリソースの競合状態により組付け他部品が組付け工程にくるタイミングがかわったときなどフリーフロートは変化する。

計画立案時、リソース r におけるジョブ (i, j) が主クリティカルパスに属するとする。このジョブ (i, j) の競合

(a) オーダ内パスと従属クリティカルパス

(b) リソース内パスと主クリティカルパス

図4 主クリティカルパスにおけるジョブの塊の例

Fig. 4. A Job Lump On The Main Critical Path

による待ち時間を考慮すると、多重計画開始時刻 MS_{ij} 、多重計画終了時刻 MF_{ij} は各々次のようになる。

$$MS_{ij} = t_i^E + \sum_r W_r \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$MF_{ij} = t_i^E + \sum_r W_r + D_{ij} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 $\sum_r W_r$ とは、これまでにジョブ (i, j) が属する

従属クリティカルパス上で交差する各リソースの主クリティカルパスにおいて待たされた時間の総和である。

結果として完成時期をきめる従属クリティカルパス上の工程毎の余裕の変化をみると、何段階かにわけて減少することが多いが、この式と一致する。何段階かにわけて減少する場合、主クリティカルパスがいくつかのリソースで発生している着手前にあった余裕はこれらの主クリティカルパスとの交点ごとに次々と段階的に減少する。したがって納期遅れが発生する場合、最終的には余裕は負になるものの、余裕が負であるという条件だけでは従属クリティカルパスの全貌は把握できない。

この一例を図4に示して説明する。図4(a)において納期遅延はオーダー23、及び25で発生していて、これに対応して従属クリティカルパスが発生していることを示してい

図5 日程計画を確定するまでのフロー

Fig. 5. Flowchart for Decision of Manufacturing Instruction

る。図ではハッチした部分で示す。図4 (b) では対応するリソース A 1、B 1、C 1 で主クリティカルパスが発生していることを示している。図では濃くハッチされた部分で2種類のクリティカルパスは交わる。たとえばオーダ23の部品1では対応する工程A、B、Cで主クリティカルパスと交わりジョブの処理待ちが発生しているが、段階的に余裕が消費されていることを余裕及び余裕消費時間数で示す。この例では時間で示しているが、日数などで示すこともある。また、図4 (b) に示すように、主クリティカルパス上では時間軸にそって待ち行列が解消されるまで、複数のジョブが連なる。これをジョブの塊と称する。

<3.3> 負荷対策へのクリティカルパス解析の応用

納期遅延が発生する場合、クリティカルパス解析を負荷対策へ活用する。これにより状況の全体像を把握し、必要に応じて負荷対策をきめる。この場合、大半はコンピュータだけでは負荷対策の解はきまらない。解はいくつかあり、選択が必要になるからである。解がいくつも存在するような場合、計画管理者の意思を反映しながら、より適した解を選び出す作業が重要である。このとき意

思を反映しやすいようにコンピュータ側では状況を明確に示すとともに、選択肢を用意する。計画管理者は種々の要因を考慮しながら意思決定したあと、選択肢の中から解を選び出し、コンピュータ側でその選択肢にあわせ結果を調べすという手順を繰り返し負荷対策をきめる。

この場合の作業の流れを図5に示す。図において、ステップ1で日程計画立案を指示したあと、ステップ2でこの結果に基づいてまず、納期順守・遅延発生状況の全体像を把握する。ステップ3では納期遅延の有無から負荷対策の要・不要を判断する。

納期遅延が発生していて負荷対策が必要と判断した場合は、ステップ4でコンピュータにクリティカルパス関連のデータ提供を指示する。コンピュータは従属クリティカルパスや主クリティカルパスについての詳細を表示する。具体的には従属クリティカルパス上での余裕消費分布や主クリティカルパスのジョブの塊などについて表示する。ステップ5でコンピュータの提供するこれらの情報に基づき、クリティカルパスの発生状況を把握する。発生状況の全体像を把握した上でステップ6では負荷対策についての意思を決定する。具体的に負荷対策とは、リソースをきめ、対策を行う期間と量をきめ、能力工数を増加させることである。

能力工数の調整で納期遅延を解消しようとする場合、あるリソースでの対策は全体的な競合状態を変化させる。そのため、期間と量をきめて対策を実施しても予想どおりの結果を得られないこともある。また、

表1 納期順守最遅日程の例

Table 1. Example of the Latest schedule to Maintain the Delivery Dates

【オーダ:2-314】

部 品:100

算出日:2月14日

No	工程	所要工数		納期順守最遅開始日程	
		日	時間	納期:2月24日 の場合	納期:3月2日 の場合
1	A		5.0	2月10日	2月15日
2	B		2.0	10日	15日
3	C	3		14日	16日
4	D		4.0	17日	21日
5	E		2.0	17日	21日
6	F		4.0	17日	21日
7	G		3.0	18日	22日
...	...	...	...	...	...
20	Z		3.0	2月23日	3月1日

表 2 納期遅延日数の例

Table 2. Examples of Delay Time in Delivery

(b) 各ケースの遅延日数

単位：日数

(a) 各ケースの負荷対策

Z1 単位：時間			
月日	ケース0	ケース1	ケース2
2月19日	0	8.0	4.0
2月26日	0	8.0	0

K1			
月日	ケース0	ケース1	ケース2
2月19日	0	4.0	0

D1			
月日	ケース0	ケース1	ケース2
2月26日	0	4.0	0

オーダ	着手日	完了指示日	納期	遅延日数		
				ケース0	ケース1	ケース2
2-211	1月7日	2月17日	2月18日	-1	-1	-1
2-212	10日	17日	18日	-1	-1	-1
2-213	11日	18日	21日	-1	-1	-1
2-225	12日	17日	18日	0	0	0
2-226	18日	22日	23日	-1	-2	-1
2-227	25日	24日	25日	-1	-1	-1
2-228	26日	23日	24日	-1	-1	-1
2-229	24日	29日	3月1日	-1	-2	-1
2-230	26日	29日	1日	-3	-2	-3
2-231	25日	3月1日	2日	0	-1	-1
2-301	2月3日	7日	8日	+1	-2	0
2-302	7日	2日	3日	0	0	0
2-303	8日	7日	8日	0	-3	-1
2-305	8日	2月25日	2月28日	0	-1	0
2-306	9日	3月10日	3月13日	0	-2	-1
2-307	10日	8日	9日	+1	-2	0
2-308	10日	14日	15日	-1	-1	-1
2-309	10日	14日	15日	0	-1	-2
2-312	15日	17日	21日	-1	-1	-1
2-313	15日	21日	22日	-2	-1	-1
2-314	15日	1日	2日	0	0	0

対策が複数のリソースにわたる場合はこの影響はさらに大きくなる。このため負荷対策を行い、結果をみて新たな結果に対応してつぎの負荷対策を検討する、というようなことも場合によっては必要になる。

負荷対策をきめるにあたっては、図4に示した主クリティカルパスのジョブの塊を考慮する。納期遅延の原因となるジョブは必ず待ち行列に入っている。そのようなジョブの前には他のジョブが隙間なく時間軸にそって並んでいる。これがジョブの塊である。納期遅延を解消するためには、ジョブの塊の起点や順序は変えないで問題のジョブの処理をもっと時間軸上の前方に移動する必要がある。そのためには問題のジョブひとつだけでなく、この部分の能力工数を増加させ問題のジョブの前にある一連のジョブの塊全体を短期間に処理し、前方へ移動する必要がある。問題のジョブをどの程度、前へ移動するかをきめると、対策を行うべき期間と量が決まる。

この負荷対策による競合状態の変化をみるため、再度日程計画を立案し、必要に応じ同様の処理を繰り返す。このようにすることで納期遅延が解消される日程計画に効率よくたどり着くことができる。

4. 製造現場における実証と考察

ここでは、ジョブショップの製造現場を対象としてとりあげ、立案された日程計画に含まれるクリティカルパスを把握し、その負荷対策について実際のデータで工期調整を行う。

<4.1> 実証 すでに着手しているすべてのオーダが納期に間にあう状態のとき、2月14日に新たにオーダ2-314を受注した場合について、表1で新規に受注したオーダのある部品における納期順守最遅日程の例を示すとともに、表2

で処理対象となる全オーダの納期遅延日数の例を示し説明する。新規オーダの納期は2月24日にならないか検討するよう顧客から依頼があった。さっそく工程設計を行い表1.に示すように納期順守最遅日程を算出した。その結果、部品100の第一工程の納期順守最遅着手日は2月10日ですでに過去の日付となり、トラディショナルクリティカルパスが発生することがわかった。工程設計をみなおしたが、工期をこれ以上短縮できないうえ、負荷の混み具合から見て無理なことが予想されるので、納期は3月2日以降にしてもらえないか顧客に相談して3月2日ということでも了承してもらえた。これでトラディショナルクリティカルパスは解消できた。現場への完了指示日は3月1日となる。そのかわり、すでに受注し着手している2-307の納期を3月16日から3月9日に早めることができないか打診があった。納期変更の場合は最遅日程が変化するためこのオーダは工程設計の段階に戻る必要がある。未着手ジョブのジョブ構成には変更がないものとし、未着手ジョブについて最遅日程や余裕などを再計算した。再計算結果によりこの時点で未着手先頭工程の余裕を調べ、トラディショナルクリティカルパスが発生していないことを確認した。つまり、未着手先頭工程の納期順守最遅開始日と当日日付とから考えると余裕があることは判明したが、他との競合でどのようになるか日程計画を立案しないとわからないので、一応検討すると回答した。この状態で日程計画を立案した結果を表2.のケース0で示す。負荷対策はなにも行っていないケース0の遅延日数の欄をみると、2-301と2-307でプラスの遅延日数が示されている。これは納期遅延が発生することを示している。そこで、負荷対策を二つのケースについて行い、結果を比較する。

ケース1は、比較のため従来の方法で負荷対策を決める場

合である。従来は負荷グラフから工程 Z, K, D のリソースで負荷が混んでいることを読み取り、これらのリソースで負荷対策を行う場合を示す。つまり、表 2 (a) に示した時間分、残業や休日出勤を行うとして計画をたてた。計画立案結果を見ておさまりそうなのでこれで実行していた。

ケース 2 は、図 5 のフローにしたがって「負荷対策を行うのに最も適したリソース」を判断する場合を示す。ステップ 1 の日程計画で得られた結果 (ケース 0) からステップ 2 で納期順守・納期遅延発生状況の全体像を把握する。ここでは表 2 (b) から 2 つのオーダで納期遅延が発生していることが把握できる。この結果、ステップ 3 で対策要と判断し、ステップ 4 でクリティカルパス関連のデータ提供を指示する。ステップ 5 で提供されたデータにより余裕消費の分布を見ると Z 1 で極端に大きな余裕消費が発生していることをつきとめ、ステップ 6 で Z 1 の主クリティカルパスに注目した。そこで Z 1 のジョブの塊をみて、期間と短縮すべき量をきめ、対応して残業、休日出勤など負荷対策をきめた結果、このようにして、リソース Z 1 でのわずか 4 時間分の残業で満足すべき結果が得られた。

<4.2> 考察 クリティカルパスの解析により、工程と期間、負荷超過量などが判断できるようになり、負荷対策がとりやすくなった。

例題により、主クリティカルパス、従属クリティカルパス、トラディショナルクリティカルパスを示し、これらのクリティカルパスを解消する様子を示した。ここではまず、第一段階でトラディショナルクリティカルパスを解消させた。そのあと第二段階で日程計画を立案し、現れた主クリティカルパス、従属クリティカルパスを解消させた。このとき、人の意思を反映させながら思いどおりの解を組立てていく感覚で最終的には最小限の負荷対策を得ることができた。

5. むすび

ジョブショップ生産の製造現場において、日程計画を立案して納期遅延が予測される場合、的をしぼった負荷対策を見つけ出す方法を提案した。ここでは納期遅延が発生するときのクリティカルパスについてその特徴を述べた。そして、クリティカルパスを調べることで負荷対策を見つけ出す方法を提案し、その有効性を検証した。

リソースにおけるジョブの競合は納期遅延問題の解決を難しくしているものの、CSMにより手順をふんで処理すれば、自らの意思を反映してより最適解に近づいた解を得ることができることを示した。

今後の課題としては、

- (1) クリティカルパスの全体像をわかりやすく表示する方法
- (2) 負荷対策の候補をわかりやすく表示する方法などがある。

(平成 12 年 5 月 24 日受付, 同 12 年 12 月 21 日再受付)

文 献

- (1) K.Mesghouni, ed.: "Evolution Programs for Job-Shop Scheduling", Proc.IEEE Int Conf Syst Man Cybern.(USA) Vol.1, 720-725 (1997)
- (2) D.Montana, "Introduction to the Special Issue: Evolutionary Algorithms for Scheduling", Evol. Comput (USA) 6[1] v-ix (1998)
- (3) 杉原弘章ら: "リソース競合問題を考慮したジョブショップスケジューリング方式の提案とその実証", 電気学会論文誌, Vol.118-D, No.1, 2001
- (4) D.Golenko-Ginzburg, ed. "A Heuristic for Network Project Scheduling with Random activity Duration Depending on the Resource Allocation", Int. J. Prod. Econ. 55[2], 149-162, (1998)
- (5) 小野功ら: "クリティカルパスの多様性に着目したジョブショップスケジューリングの進化的解法", 知的システムシンポジウム資料, 25th, 7-12 (1998)
- (6) D. Bradbury "Using the Theory of Constraints to Bring Projects in on time", Int Conf Proc Am Prod Invent Control Soc(USA) 39th 161-162 (1996)
- (7) V.D.Wiley, ed.: "Optimization Analysis for Design and Planning of Multi-Project Programs", Eur J Oper Res, 107(2), 492-506 (1998)
- (8) 浜屋毅他: "ジョブショップ生産における負荷計画とスケジューリングの統合", 精密工学会中国四国支部・九州支部共催学術講演会講演論文集, 61-62 (1996)

杉原 弘章 (正員) 1965 年大阪大学基礎工学部電気工学科卒業。1967 年東京大学大学院工学系研究科修士課程電気工学専攻修了。同年三菱電機株式会社入社。鉄鋼圧延プラント、食品製造ライン、自動車部品製造ライン、自動倉庫などのコンピュータ制御システムの開発、金型工程管理システムの開発などに従事。日本

ME学会会員。