

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

杉原 弘章*1、小泉 寿男*2、片岡 信弘*1、高原 照明*1

*1 三菱電機株式会社、*2 東京電機大学

ジョブショップ生産の製造現場ではリソースにおけるジョブの競合が日常的に発生し管理を困難にしているが、この問題を解決しながら日程計画を立案し管理する方式を提案する。我々はこの方式をCSM (Concurrent Scheduling Method) と呼ぶ。

CSMでは、まず個々のオーダー対応の工程設計でジョブ構成を明確にしてPERT図に似たCSMのプロセスチャートで表し、このジョブ構成にそって順次、進捗を把握する。そして、すべてのオーダーの未着手ジョブに対して、リソースが最大限に活用されるような日程計画を立案し管理する。さらにクリティカルパスを明確にししながら負荷対策に役立てることができるような情報を提供する。このようにすることで、工場全体として加工の流れの最適化をはかるとともに、新規受注、納期変更依頼、進捗変化などの状況変化に速やかに対応する。

A Proposal of a Job Shop Scheduling Method for Solving Resources Contention Problems and its Verification

Hiroaki Sugihara*1, Hisao Koizumi*2, Nobuhiro Kataoka*1, Teruaki Takahara*1

*1 Mitsubishi Electric Corporation, *2 Tokyo Denki University

We propose CSM (Concurrent Scheduling Method) for the manufacturing site management in the job shop production. CSM aims to complete all the orders keeping the delivery date. In CSM, processing procedure is expressed in the CSM's Process-Chart similar to the PERT chart. The Process-Chart consists of Job-boxes and 2 kinds of Connectors, Connectors-in-the-order and Connectors-in-the-resources. Job-boxes and Connectors-in-the-order show a procedures of an order. Job-boxes and Connectors-in-the-resources show load orders of a resource. Using the Process-Charts, we can see huge information, changing hour by hour. A plan is made reflecting these information, and this plan achieves the flow of the best processing on the manufacturing site.

1. まえがき

製造業、とりわけ機種別に機械が配置されたジョブショップ生産の製造現場では、工作機械などの現有リソースを最大限に活用して短期間でものづくりをすることがますます重要となっている。このような製造業では、製造単位をオーダーと称し、製造現場に対してオーダーごとに製造命令が出される。製造現場ではこれを受けて製造に必要な要素作業としてのジョブを日程計画に組入れる。ひとつのオーダーで製造される製品が複数種類の加工部品で構成される場合、各部品は一連のジョブで表現される

加工手順にしたがって加工され、組付け、分離などを経て最終的に製品として組立てられる。

製品の製造期間は材料投入から出荷までの日程計画できまるが、いままで、現有リソースを最大限に活用して短期間で製造するための最適な日程計画を立案することはきわめてむずかしいとされてきた。⁽¹⁾ その理由は、複数のオーダーの部品がリソースを共用して加工されるとき、各リソースにおいて発生するジョブの競合を調整することが困難であったためである。

日程計画立案の過程では、従来、DP法⁽²⁾ (Dynamic Programming Method)、PERT⁽³⁾⁽⁴⁾ (Program

Evaluation and Review Technique)、TOC⁽⁵⁾ (6)
(Theory Of Constraints)などが用いられているが、
いずれも十分なものではない。

本稿では、ジョブショップ生産の製造現場でリソース
におけるジョブの競合問題を解決しながら日程計画を立案し
管理する方式を提案する。我々はこの方式をCSM
(Concurrent Scheduling Method)と呼ぶ。

我々は、このCSMをジョブショップ生産の一例として
金型の製造現場に適用し、CSMの有効性を検証した。

本稿では、2章でジョブショップ生産の製造現場にお
ける従来の管理手法とその課題について述べ、3章で
CSMを提案する。4章で実際のジョブショップ生産の製造
現場へのCSMの適用とその評価について論じ、考察を
行う。

2. ジョブショップ生産における従来の管理手法と その課題

ジョブショップ生産の製造現場では、通常、大日程つ
まりオーダーごとの着手日と完了日(納期)での管理が行
われている。この様子を図1.に示す。図において、新
規オーダーの製造命令を受けると、このオーダーの工程設計
を行いジョブ構成を確定し、大日程計画へ組み込む。現
場へはジョブ構成と大日程を提示し製造を指示する。指
示に基づいて一連のジョブが開始され、進捗結果が日々
報告される。たいていの場合、その報告を活かすしく
みがないため、この報告はあまり活用されていない。進
捗問い合わせなどで進捗把握が必要になると、別途、現場
をまわって必要な部分だけ調査する場合が多い。あるオ
ーダーが、大日程計画により示される納期からの大幅なお
くれが予想される事態が発生すると集中的に負荷対策を
講じるが、手おくれとなる場合が多い。

このため、従来、各種の管理手法が試みられてきたが、
これらの管理手法をジョブショップ生産の製造現場に適
用するときの課題について以下に述べる。

(1) DP法の適用と課題 DP法は工程設計時、ひ
とつの部品について複数の加工手順が可能な場合、加工
手順をすべて洗い出し、これらの手順のうち、所要時間
の最も短い手順を見出すことをめざす。

DP法では、同じような機能/性能のリソースが複数
台ある場合はこれらをまとめて工程と称して、加工手順
は工程名で示していた。リソース別の負荷状況の推移は
事前に分かりにくく、管理に結びつけにくいという問題
があった。

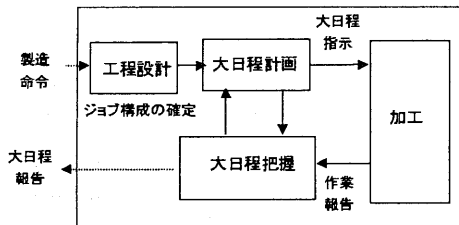


図1. 製造現場の管理

Fig.1 Outline of Control for Manufacturing Site

(2) PERT手法の適用と課題 ジョブショップ生産
においてひとつのオーダーで複数種類の部品の加工を必要
とする場合、オーダー対応で一義的に表現される加工手順
ですら複雑な構成となることが多い。このため、PERT
図を単に加工手順の表現や進捗状態の把握手段としてだ
け利用していた。

ところが各リソースにおけるジョブの実行の順番をオ
ーダー内あるいはオーダー間にまたがって調整し決定する
ことはPERT手法では取扱っていない。

(3) TOCの適用と課題 リソースにおけるジョブ
の競合問題を解決する方法としてボトルネックリソース
に対しチューニングの考え方をTOCでは提案しているが、
手順が複雑なうえ、ジョブショップ生産の製造現場では
日々、ボトルネックリソースが変わることが多く、日常
的に使いこなすには容易ではなかった。

3. CSMによる製造現場管理の提案

2章で述べた問題解決のため、主としてジョブショッ
プの製造現場を対象として、製造現場全体における加工
の流れの最適化をはかる管理手法を提案する。

3.1 CSMの基本方式

CSMではオーダーごとのジョブ構成を多重化して、共用
するリソースにおけるジョブの競合を調整しながら日程
計画を立案する。そして、この日程計画に基づいて製造
現場における最適な加工の流れを実現することにより、
納期順守ですべてのオーダーを完成させることをめざす
ものである。

CSMによる製造現場の管理の基本方式を図2.に示す。
図において、新たなオーダーは製造命令として受け、まず
このオーダーの工程設計を行う。工程設計ではジョブ構成
を確定する。すでに着手しているオーダーについては、各
々のジョブ構成上で進捗を把握する。そしてこのように把
握した個々のオーダーのジョブ構成を多重化する。多重化
するのはオーダーおよびリソースにおける制約を満たし
つ最適な日程計画を立案するのに都合がいいからである。
多重化して日程計画を立案すると、この計画に基づき現
場に作業指示を行う。現場ではこの作業指示により加工
し、結果を指示対応で報告する。この報告はジョブ構成
上に反映され、進捗・実績が把握される。これはつぎの
日程計画に組み込まれる。また、日程計画に基づき今後
の負荷推移を予測し、必要なら負荷対策を行う。最新の
状況を絶えず把握しながら処理を進めるので、各オーダー
の進捗状況や負荷推移予測内容はいつでも報告できるし
くみとなる。

図3.にジョブ構成を表現するCSMのプロセスチャ
ート(以下、単にプロセスチャートと称す)の一例を示す。
図においてひとつの箱はジョブボックスと称し、要素作
業としてのジョブを表す。ジョブボックスの中には工程
名を、()内の数字は見積もった所要工数を表し、[]
内には日程計画時にリソース名を入れる。ここで工程と
は、機能、性能の同じリソースをひとつにまとめたもの
を称している。

工程設計の段階ではジョブボックスの配置と相互関係、
工程名、所要工数を決め、リソースは決めない。

CSMではオーダー対応のジョブ構成を多重化するため、
PERT図におけるアクティビティをジョブボックスと2種
類のコネクタ、すなわちオーダー内コネクタとリソース内

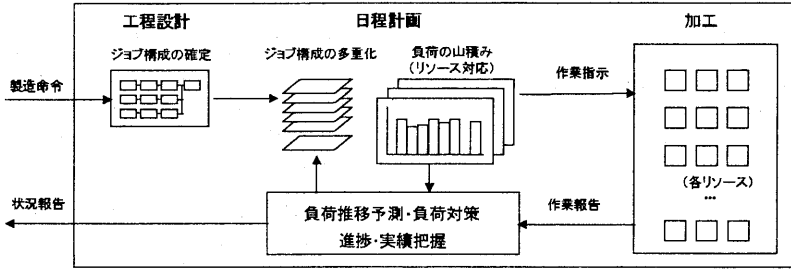


図2. CSMによる製造現場の管理の概要
Fig.2 Outline of Management by CSM

コネクタで構成する。この様子を図4.に示す。図ではジョブボックスと2種類のコネクタの関係を示す。オーダー内コネクタは工程設計で得られた各部品の加工手順を表現するのに用い、リソース内コネクタは日程計画で得られる各リソース対応の加工順序を表現するのに用いる。具体的には、オーダー内コネクタはプロセスチャートで示し、リソース内コネクタはリソース対応の作業指示などで間接的に表示する。日程計画を立案するたびにリソース内コネクタはつなぎかえる。このようにする理由はジョブをあるときはオーダーのジョブ構成の一部として把握し、またあるときはリソースの負荷の一部としてとらえることが容易にできるためである。なお、PERT図ではコンピュータ処理を円滑に行うためジョブとジョブとの結合点にイベントナンバーがつけられ、ときにはダミーパスが用いられるが、CSMではダミーパスは用いず、結

合点は表示しないで内部処理にとどめる。

CSM では、日程計画を立案するとき、すべてのプロセスチャートを横断的にみながら急ぐジョブから順番に加工される日程計画を立案する。各リソースにおけるジョブの競合に対し、急ぐジョブから順番に加工されるようにジョブボックスをリソース内コネクタで接続することで最適化をはかる。この日程計画の結果をベースに現場に作業指示を行い、作業順を指示する。

製造現場における加工方針はいくつかあるが、当CSMでは納期順守を第一とする。つまり、オーダー*i*の納期*d_i*、実績完成日*f_i*としたとき、計画立案は、

$$\sum \max(0, f_i - d_i) \rightarrow 0 \dots \dots \dots (1)$$

である。

3. 2 CSMにおける日程計画

日程計画は、プロセスチャートで表現される各オーダーのジョブ構成及び進捗情報に基づいて立案する。日程計画を立案することにより、製造現場全体の負荷状況推移を明確にするとともに、クリティカルパスを明示する。

(1) 日程計画の立案 日程計画はリソースごとのジョブの順番、つまりリソース内コネクタのつなぎ方を決定する。これは、オーダー内コネクタの接続を保ったまま行うためすべてのリソースに関して並列に時系列にそって行う。

オーダーAの目標完成日を*P_A*とすると、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は開始点、結合点*n*は完了点を意味する。また、(k,i)∈A はジョブ (k, i) がオーダーAに属することを表し、*D_k* はジョブ (k, i) の所要時間を表す。

$$t_0^E = 0 \dots \dots \dots (2)$$

$$t_i^E = \max_{(k,i) \in A} (t_k^E + D_{ki})$$

$$(i = 1, 2, \dots, n) \dots \dots \dots (3)$$

$$t_n^N = P_A \dots \dots \dots (4)$$

$$t_i^N = \min_{(k,i) \in A} (t_k^N + D_{ki})$$

$$\dots \dots \dots (5)$$

結合点*i*から結合点*j*へのジョブをジョブ (i, j) とするとジョブ (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。

$$ES_{ij} = t_i^E \dots \dots \dots (6)$$

$$EF_{ij} = t_i^E + D_{ij} \dots \dots \dots (7)$$

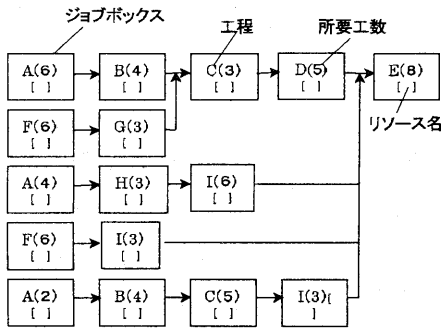


図3. CSMのプロセスチャート
Fig.3 An Example of a Process-Chart

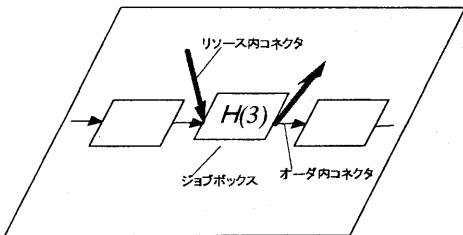


図4. ジョブボックスとコネクタ
Fig.4 Job Boxes and Connectors

$$NS_{ij} = t_j^N - D_{ij} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$NF_{ij} = t_j^N \quad \dots\dots\dots (9)$$

また、全余裕時間 TF_{ij} 、自由余裕時間 FF_{ij} はつぎのようになる。

$$\begin{aligned} TF_{ij} &= t_j^N - (t_i^E + D_{ij}) \\ &= NF_{ij} - EF_{ij} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\begin{aligned} FF_{ij} &= t_i^E - (t_i^E + D_{ij}) \\ &= ES_{jk} - EF_{ij} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで ES_{jk} はジョブ (i, j) のすぐ次に続くジョブ (j, k) の最早開始時刻を意味する。

PERT 手法では、開始から完了までの期間を短縮するための方策の検討が重要な目的のひとつであるため、

$$t_n^N = \lambda \quad \dots\dots\dots (12)$$

としている。λ はプロジェクト遂行時間である。ところが CSM では納期との関連でジョブの競合を調整したり各オーダーの納期が確保できるかどうか、あるいは各リソースの負荷推移などを調べるのが重要なテーマとなるので、(12)式ではなく(4)式を用いる。つまり、納期を基点として逆算することを意味する。さらに、PERTでの最遅結合点時刻に対応して、CSMでは納期を順守するための最遅結合点時刻という意味で納期順守最遅結合点時刻と名づけ、計画立案などにこれらの算出結果を用いる。

飛込みの製造命令がランダムに次々としてくるような製造現場で納期順守が要求されるときに日程計画を立案する場合、余裕は将来の飛込み受注に備え温存しておく必要があるため、余裕時間を組み込む。

あらかじめ、準備したこれらのデータを用いて現在から未来に向かって順次日々の負荷を確定して日程計画を立案する。各工程の各リソース対応でいくつかの部品が着手可能状態にあるとき、加工の順番は重要である。ここでは納期順守を第一に考えるので、オーダーA、部品Pのジョブ (i, j) の全余裕時間を $TF_{ij}(A, P)$ としたとき、着手可能な部品について、

$$\min TF_{ij}(A, P) \quad \dots\dots\dots (13)$$

を選択して、計画をすすめる。つまり、工程設計で確定したオーダー内コネクタの接続順を保存しながら、すべてのジョブボックスをリソース内コネクタで結び、最も全余裕時間が少ないものから順に加工されるようにジョブの順番を順次確定しながら接続する。

このように、工程のリソースには部品が集まってくるがこれらを論理的に最適な順序により加工する計画を立案することで、全体として納期順守をめざす。

計画立案結果により、リソース対応の負荷の移り変わりがわかり、納期が守れるかがわかる。守れない場合は負荷対策の必要な時期、工程、量などを判断する材料としてリソース別負荷グラフなどが得られる。必要に応じて一時的な計画残業/人員の増強、一部外注化などの負荷対策をしたあと、再度、日程計画を立案することでその効果を知ることができる。

なお、ここまで時刻についてはすべて相対日時で論じた。これは各リソースの時間軸が同じと想定したからである。ところがあるリソースだけ、ある期間、残業や休日出勤などの負荷対策を行う場合は時間軸がリソースごとに異なるため暦日・時刻を用いて日程計画を立案する。

(2) 日程計画の結果としてのクリティカルパス CSMでは日程計画を立案することにより、保有するリソース

を最大限に活用した場合、オーダーのこみ具合も考慮して各オーダーの納期が確保できるかどうかを予測することが可能になる。納期遅延が予測される場合、どの程度の対策で解消できるかなどを判断する必要があるが、このためまず納期遅延の第一要因を見極めなければならない。この場合、CSMにおけるクリティカルパスが重要になる。

PERT手法では一連のクリティカルパスがひとつのプロジェクトの開始から完了まで走り、プロジェクト遂行時間をきめるパスを表す。CSMではクリティカルパスは意味が異なり、工場全体として各オーダーの納期を左右するパスを表し納期順守余裕日数が閾値を切る部分として把握されるが、つぎのような3種類のクリティカルパスが現われる。(7)

- ・主クリティカルパス (リソース内クリティカルパス)
- ・トラディショナルクリティカルパス (オーダー内クリティカルパス)
- ・従属クリティカルパス

図5.にこれらを示す。図において、主クリティカルパスはリソース内コネクタで結ばれる一連のパスのところどころに現れ、リソースの負荷超過の発生を示す。トラディショナルクリティカルパスはオーダー内コネクタで結ばれる一連のパスに現れ、着手から完了までとぎれない。PERTにおけるクリティカルパスとよく似ていて、一時的に他のすべてのオーダー処理を停止してそのオーダー単独で処理しても納期に間にあわないことを示す。従属クリティカルパスもオーダー内コネクタで結ばれるパスに現れるが、トラディショナルクリティカルパスとは異なり、主クリティカルパスに属するジョブから完了点まで続くパスに現れる。通常、従属クリティカルパスに対する負荷対策は不要で、主クリティカルパスが解消されれば自動的に解消される。

4. 実証と考察

ここでは代表的なジョブショップ生産の製造現場として金型製造現場を選び、前章で提案した CSM を適用して実証するとともに結果について考察する。

4.1 実証システム

通常、金型製造現場では機能や性能の同じあるいは類似した機械はひとつの工程としてまとめ、この工程名を用いてプロセスチャート上で手順を表現する。ただし現

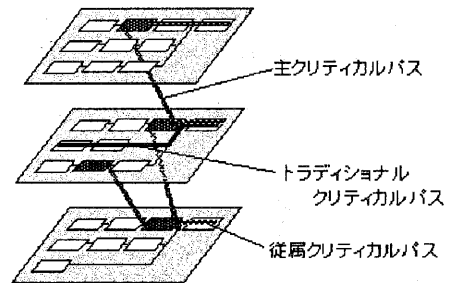


図5. CSMのクリティカルパス
fig.5 Critical Paths in CSM

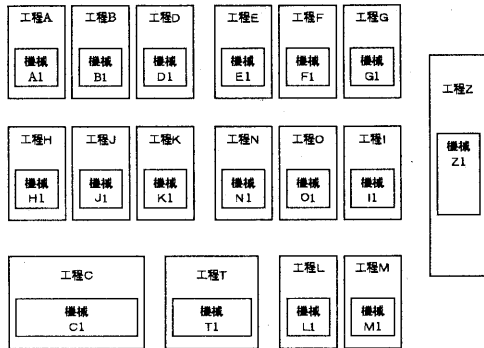


図 6. 金型製造現場の例

Fig. 6 an Example of Die-Mold Manufacturing Site

在、この現場では各工程は機械が1台で構成されている。この金型製造現場の機械概略配置および工程と機械との関係を模式的に図6. に示す。

この現場は、AM8:00に始まりPM5:00に終わるが残業が多く、日程計画では残業を加え1日10時間としている。土曜日、日曜日および祝祭日は休みである。新規に金型を製作するオーダのほか、客先の生産ラインで使用されている金型の手直しや修理などの割込みの特急オーダも多い。納期遅延は顧客の生産活動の停止につながり多大な影響を与えるので、この工場での基本的な方針は「納期順守」としている。

4. 2 日程計画の結果

日程計画の一例として、3月15日始業時からの日程計画を立案する。

(1) 工程設計結果 工程設計例として、製造番号2-211のプロセスチャートを図7. に示す。製造現場では、このオーダのほか複数のオーダが並行して処理されている。

(2) 日程計画結果 この製造現場でのCSMによる日程計画の立案結果を図8. (a)の大日程表で示す。図では受注日から納期までの期間を上の方で示し、実績着手期間と今後の計画期間とを下の線で示している。縦の線は絶対守るべき日程を参考として示している。リソース別日別の細かな日程計画結果などはここでは記載を省略する。

(3) 納期変更例 このような状態で、すでに着手している製造番号2-303のオーダの納期を4月8日から3月30日に早めるよう依頼があり、可能性を調べる必要が生じた場合について述べる。影響を調べるため、納期を変更しCSMで日程計画をたてなおす。結果は図8. (b)の大日程表となる。このままであれば製造番号2-302などが納期を確保できず納期遅延となることがわかる。このときの負荷グラフの一例として工程Zの機械Z1について図9. (a)に示す。図では稼働日はほぼ充足されていて負荷がこみあっていることがわかる。

このため、工程Eは3月20日、工程Zは3月20日と

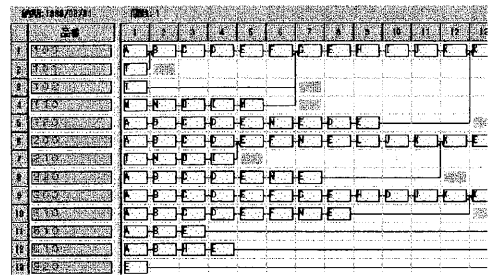
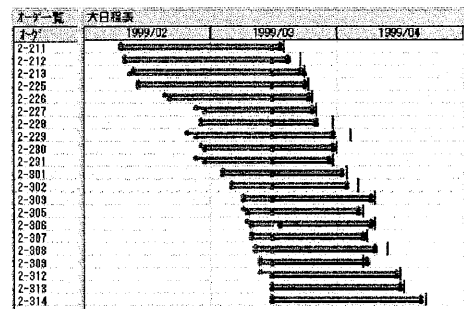
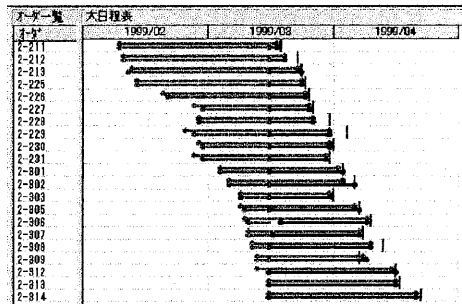


図 7. CSMのプロセスチャート

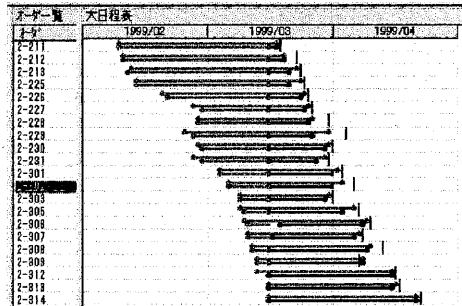
Fig.7 an Example of CSM's Process-Chart



(a) 納期短縮依頼前の大日程



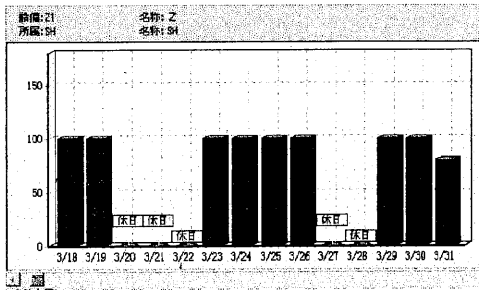
(b) 納期短縮依頼を受けた大日程 (負荷対策前)



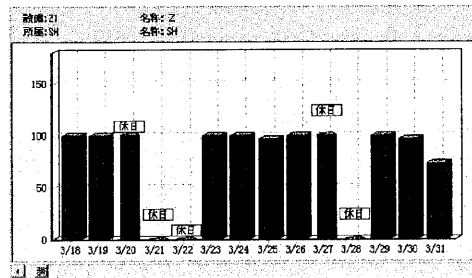
(c) 納期短縮依頼を受けた大日程 (負荷対策後)

図 8. 大日程表

Fig.8 Scheduling Chart



(a) 日程計画結果 (納期変更依頼前)



(b) 日程計画結果 (負荷対策後)

図9. 日程計画結果 (機械 D1 の例)
Fig.9 an Example of Sceduling for Machine D1

3月27日を休日出勤とし、かわりに工程Zは4月5日を代休とする負荷対策を行い、能力工数を増やした。その上でCSMで日程計画をたてなおした結果、大日程計画は図8.(c)となり、負荷対策により納期遅延が解消できたことが確認できる。なお、負荷グラフは図9.(b)のように変化する。

4.3 考察

CSMによる日程計画結果の一例を図8.、図9.で示した。図8.(a)では3月15日時点で、進捗を反映してCSMでたてた日程計画を大日程で表現する。ここでは、すべてのオーダーが納期に間に合っていることがわかる。このような状態で製造番号2-303のオーダーについて納期変更依頼がきたため、納期を変更して再度計画を立て直した結果が図8.(b)、図9.(a)である。図8.(b)では他のオーダー、例えば3-302などに影響が現われ納期遅延が発生することを示している。このときの工程Zの負荷グラフを図9.(a)に示す。図において、連日、負荷が100%であるが、これはリソースZ1で主クリティカルパスが発生し納期遅延の一因になっている可能性を示している。

そのため、休日出勤などの負荷対策を行って計画を立て直した結果が図8.(c)、図9.(b)である。図8.(c)では、製造番号2-303のオーダーについての納期変更依頼もみだし、しかも他のオーダーで納期遅延が解消されたことにより、リソースZ1でのクリティカルパスが解消したことがわかる。この負荷対策により、リソースZ1の負荷グラフは図9.(b)にかわる。このグラフでは休日の3月20日、27日が休日出勤になったことを示している。依然として連日、負荷が100%であるが、図8.(c)では納期遅延は解消されたことを示している。

5. むすび

ジョブショップ生産の製造現場を対象に、現有リソースを最大限に活用し短期間でのづくりをするためのしくみとしてCSMを提案した。CSMでは、ジョブ構成を多重化してジョブの競合を調整しながら日程計画を立案することにより最適な加工の流れの実現をめざしている。ここではCSMを金型の製造現場に適用して、その有効性を検証した。飛び込みの特急オーダーが入ってきたとしても、納期の早い通常どおりのオーダーとして日程計画に組み込むことですみやかな対応が可能となった。

今後の課題として、

- (1) CSMにおけるクリティカルパスの究明と、より効果的な対策
- (2) 各ジョブの工数見積精度が良くない場合の対策などが存在する。

文 献

- (1) MAHADEV N V R, "On the meaningfulness of optimal solutions to scheduling problems: can an optimal solution be nonoptimal?", Oper Res (USA) 46[3 Supplement] S120-S134(98)
- (2) Bellman, R. : "Dynamic Programming", Princeton University Press (1959)
- (3) 関根智明: PERT・CPM, 日科技連, (1985)
- (4) 森竜雄: PERT, 日本能率協会, (1969)
- (5) BRADBURY D, "Using the Theory of Constraints to Bring Projects in on time", Int Conf Proc Am Prod Invent Control Soc(USA) 39th 161-162(96)
- (6) 稲垣公夫: TOC クリティカル・チェーン革命, 日本能率協会マネジメントセンター(1998)
- (7) 桜田孝, 杉原弘章: "多重 PERT 手法による工程管理", Proceedings of the First Intelligent FA Symposium A3-3, JAACE, July(1987)