運用特性を考慮した機械ショップスケジューリング技法 CASS-III

Practical Scheduling Method for Machine Shops CASS-III

エレクトロニクス事業部　今村眞明[*1]　片山幸子[*2]
三原製作所　辻　昭治[*3]　黒川勝三[*3]

当社では，小物部品から超大物部品までの機械加工を行っており，それらの機械ショップの日程管理が重要な課題の一つとなっている．従来一般のスケジューリング手法は，AIや数理計画法等技法中心に開発されてきていたが，機械ショップの多岐にわたる制約条件を取扱うことができなかった．このたび，対象を機械ショップに限定することにより，機械ショップの持つ一般的な特性を標準として取扱うことができ，かつ高速に現実的な規模の対象を処理することのできる機械ショップスケジューリングシステムCASS-IIIを開発・実用化した．

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. manufactures various kinds of machine parts using machine tools. The scheduling of the machine shop is a significant item. The status of the machine shop, which has usually many unexpectable factors, changes continuously. Under this situation, the optimality of the schedule is discussed and one practical scheduling methed, CASS-III, which can treat the actual scale of the machine shop, has been suggested. CASS-III can solve the scheduling problem which has various characteristics and conditions of machine shops. An example of practical use of CASS-III is introduced in the final section.

1．はじめに

当社は，小物部品から超大物部品まであらゆる種類の機械加工を行っており，それらの機械ショップの日程管理が重要な課題の一つになっている．しかし，納期を守りかつ設備の稼働率を最大にし，さらに工期を短縮するためには単なるスケジューリングソフトを導入しただけではなく，それを使いこなす土壌整備が必要である．当社においては二十年近くスケジューリングソフトの開発とともにそれを使いこなすため現場管理データの整備を行ってきた．

当初は，コンピュータ能力が追いつかず実用的な規模の計算に膨大な時間と費用が掛かっていた．次の段階では進ちょく実績把握がリアルタイムにできず，タイムリーなリスケジューリングができなかった．CIM化が進み，進ちょく実績がタイムリーに把握できる時代になって，まさにそのスケジューリングソフトの威力が発揮できる時代になった．しかし，機械ショップにはその固有の特性や制約条件があり，それらがすべて満足されるスケジューリングシステムでないと現場での実用には耐えられない．本報では，機械ショップのそれらの運用特性を考慮して開発した機械ショップスケジューリングシステムCASS-III（Computer Aided Shop Scheduling for Intelligent and Interactive Improvement Tool）を紹介する．

2．機械ショップスケジューリングの特徴

機械ショップは，その加工する対象部品によって形態，管理方式が異なる．日程管理レベルと対象部品によるスケジューリング方式の違いを表1に示す．

スケジューリングには納期，工程，材入日，設備稼働カレンダ等の情報が必要であるが，日程立案時にそれらすべての情報が確定していない場合が多い．また飛び込み工事や内外作の変更によりスケジューリングの対象部品が変更されることも多い．当社の

表1　機械ショップスケジューリングの種類
Various kinds of scheduling methods for machine shops

		対象部品の大きさ		
		大物部品	中物部品	小物部品
日程計画レベル	大日程（オーダ単位）	製品/工事単位の線表	期間単位の生産数量計画	
	中日程（ユニット単位）	・時点計画日程（時分単位）工程一つずつ詳細に管理（CASS-IIIの対象領域）	・期間計画日程（日単位） ・ライン・セル単位に日ごとの生産すべき個数による管理	
	小日程（部品）			
	差立（工程）			FMS・セルの投入計画

ように加工期間が数か月に及ぶ部品を扱う場合，先行き1年間の計画が必要なときでもその2倍以上の期間のスケジュールを行わないと正確なスケジュールが得られない．さらにこれらの情報には設備故障や材料遅延等予期せぬ要因による不確定さを含んでいる．

機械ショップでは多岐多様な現実的な運用が行われ，その条件を加味してスケジュールする必要がある．共加工，工程分割，ロット分割，1個流し加工，外注工程，1パレット複数個同時加工などである．これらの条件が一つでもスケジュールで考慮できないと現場では使われない．

さらにスケジュール結果の評価が難しい．例えば10部品のスケジュールを行って，(1)すべての部品が1日の納期遅れの場合と，(2)1部品だけ10日の納期遅れの場合では，どちらのスケジュールが良いと言えるだろうか．遅れの深さはいずれも10日であり，同じである．(1)の場合だと1日の休日稼働を行えば良いし，(2)の場合は遅れた部品のみ外注に出せば良い．どちらの対策がそのショップで採りやすいかである．また，通常設備能力以上の仕事量を持ちそのやり繰りをしているのが現状であり，公式どおりにスケジュールを行ってすべて納期に納まるということは

*1 開発・製造部SIセンター主務
*2 開発・製造部SIセンター
*3 工作部管理課

ほとんどない．このとき無理に最適化を行ってすべてを納期どおりに入れたとしてもそのスケジュールはひずんだものとなり，現実的ではない場合が多い．現場は常に納期を守ったスケジュール結果を求めているのではなく，納期を守るための事前の対策が分かるスケジュールを必要としているのである．

小日程計画の場合タイムリーな進ちょく実績の把握が不可欠である．初期値が誤っていればスケジュールは無意味なものとなる．そのためには，POPシステム等リアルタイム進ちょく実績把握システムが不可欠である．

3．機械ショップスケジューリング手法の現状

一般のスケジューラと呼ばれるソフトは，かなり発表されているが[(1)(2)]，次のような点で問題がある．当社における通常規模の対象を取扱えないか，取扱えても計算時間が掛かる．また現場で要求される諸制約条件を取扱うためには多大なカスタマイズ（対象別機能追加）作業と費用が必要である．

そこで対象を機械ショップに限定することにより，通常機械ショップに要求される機能を標準で持ち，ほとんどの機械ショップで直ちに実用レベルで使用できる機械ショップスケジューリングシステムCASS-IIIを開発した．

4．CASS-IIIの開発思想

4．1　スケジューリングの最適性

2章でも述べたとおり，スケジューリング結果の評価を議論する上で次の課題がある．

(1) スケジューリング結果の評価尺度が一意には決まらない．

(2) 定量的には ①納期遅れ最小 ②生産量最大 ③工期短縮（仕掛最小）④設備稼働率最大 ⑤段取回数/段取時間最小等が評価尺度としてあるが，これらは相互に矛盾する点がある．

(3) スケジューリングに使用される元データそのものが確定的なものではなく，あいまい性を含んでいる．

(4) ある時点で厳密に最適な結果が得られたとしても，少し時間がたてば，現場の状況が変化しその最適性の意味はなくなる．

(5) 生産は期限を限らずに継続されるものであり，ある期間だけの最適性は意味がない．

(6) 例え最適性が定義できたとしても，それに近づけるための打ち手は実際の現場には無限にあり，自動でそれを決定することはできない．

そこでCASS-IIIを設計する上で下記の点を目標とした．

(1) 最適性の追求ではなく，人が作成するのと同等レベルの現実的な解を短時間に求められること．

(2) スケジューリングの結果を見て対話型で容易に条件を追加・変更し，リスケジューリングが容易なこと．

(3) ①納期 ②設備稼働率 の優先順序でロジックが組まれること．

(4) スケジュールの結果がなぜそうなったか人が判断できること．

4．2　大日程・中日程・小日程への展開での位置づけ

大中小日程の関係は，データ的に小日程の積み上げが中・大日程と考え勝ちであるが，実際にはそれぞれの使用目的が異なり，大日程を作成する時点では小日程のデータがないのが現状である．そのため大⇨中⇨小日程のデータの連続性がない．

大日程は，個々のショップでの特性があるとともに作成作業量としては多くないので，それぞれのショップごとに別途取り扱うことにし，CASS-IIIは中・小日程を対象とすることとした．中日程で小日程レベルの精度での検討は従来できなかったが，詳細工程設計ができていない部品に対しては過去の類似部品のデータを用いることにより，精度の高い中日程検討をできるようにした．

スケジューリング手法を議論する際バックワード方式かフォワード方式かが議論されるが，使用目的によりどちらが良いかが決まると考える．CASS-IIIにおいては，中日程計画はバックワードで，小日程計画はフォワードでというように明確に区別した（表2参照）．バックワードは無限資源スケジュールであるので各工程に余裕時間を設けることにより，現実とのかい離を避けた．その余裕時間の設定の方法としては，(1)一律一定時間，(2)加工時間に比例した時間，(3)待ち行列理論を用いた各工程の待ち時間の推定値，の3種類の選択が可能とした．

表2　中日程と小日程の違い
Middle range and short range schedule

項目＼機能	中日程機能	小日程機能
スケジュール方式	バックワード	フォワード
有限/無限資源	無限資源	有限資源
結果表示	ガントチャート/山積み	ガントチャート/表形式

4．3　標準時間の考え方

スケジューリングのベースとなるのが標準時間であるが，その定義は利用目的によって異なる．すなわち，(1)工法から積上げられた作業時間値，(2)予算工数或いは目標工数，(3)実績時間，である．またこの時間値は，(1)マシン時間と(2)人工時間がある．日程計画に使用するためにはマシン時間で実績時間でなければならない．人工工数の場合は1人で複数の機械を持つ多機使用の場合その係数が掛けられていることがあり，そのままスケジューリングには使用できない．CASS-IIIでは，標準時間は変えずに補正係数を用いて各工程ごとに真のマシン時間を求めることができるようにしている．また同じ工程でも使用する機械が異なれば，加工時間が異なるので，各工程の代替機械ごとに標準時間及びその能率が与えられる．

次に60 minの機械の空きがあり，61 minの加工時間の作業の場合通常そこでは作業できないが，人がスケジュールを作成するときはその間にその作業を割付けるのが普通である．もしこのとき，後工程を1 minづらせばその後のすべての工程に影響が波及し，計算効率が悪くなる．CASS-IIIでは，加工時間のあいまいさを考慮し，このような場合圧縮率が一定範囲内であれば加工時間を60 minに圧縮し作業を割付ける．この機能により納期遅れを飛躍的に少なくすることができた．

4．4　納期と材入日の考え方

スケジューリングを行ってみて最初に現実と合わない結果が出るのに驚くが，その原因は正しい納期と材入日が設定されていないことが多い．正しい納期と材入日とは，現実の納期と材入日ではなく，求めたいスケジュールに合った納期と材入日のことである．例えば同じ製品/工事の部品であれば納期はすべて同じとなっている場合が多いが，現実に見ればそれぞれの部品の必要時期は異なる．材入日においても素材が入ればその時点から加工開始できるがそうすれば早く造り過ぎる．納期をベースとしたスケジューラにとって納期と材入日の設定が重要であり，この決定が生産管理の重要なポイントとなっている．この決定は，中日程レベルの検討項目であり，CASS-IIIでは，中日程機能におけるバックワードスケジュールの結果に基づき，部品の材入日を検討・決定できるようにした．

4．5　対話型スケジューリング

スケジューラにおいて作業者の意図が随時織込めることが必要である．そのためにCASS-IIIでは，対話型で工程を移動させることが可能である．しかし，一つの工程を移動する度に再計算させれば計算機の応答が極めて悪くなる．そのためCASS-IIIではすべての移動の後再計算させることにしている．一つの部品を動かせばその後の他のほとんどの部品に影響を与える．人手による工程移動・事前指定を行えば，それだけ制約条件が増え，通常納期に関する評価尺度を悪化させる．それを緩和させる機能として5.3節で述べる工順変更，ロット分割，工程分割，工程圧縮等を用いてスケジュール結果の改善を図った．

5．CASS-IIIの機能

5．1　CASS-IIIの構成

CASS-IIIは，4章の開発思想を反映させ，次の構成とした．

(1) 上位生産管理システムとのインタフェース．
(2) 中日程計画検討機能．
(3) 小日程計画検討機能．

上位生産管理システムインタフェースは，対象部品の抽出とCASS-III用にデータ変換を行う．上位生産管理システムでは，小日程計画に必要な工程に関する細かなデータを有しておらず，このデータ変換により個々の工程の詳細データに展開する．

中日程計画検討機能では，納期からのバックワードの日程展開を行い，その日程に基づく機械別山積みを行う．これにより事前に設備稼働日・時間の調整，納期・材入日の調整，内外作の変更を行う．この段階の調整が行われているかによって次の段階の小日程計画の成否が決まる．

小日程計画検討機能では，材入日からフォワードに各工程の機械への割付けを行う．割付けには，通常納期に対する余裕度をベースにした優先度を使用する．この割付けに際し機械ショップとしての各種制約条件を考慮する．

5．2　スケジューリングエンジン

機械ショップの小日程レベルの基本的なスケジューリングロジックは，我々の調査では次の二つに集約できた．

● 納期優先（納期遅れを出さず，極力完了を納期に近づける）．
● 特定の機械の稼働率優先（通常部品の納期より優先）．

このためスケジューリングは，次の2段階に分けて行うこととした．(1) 特定機械（以後優先機械と呼ぶ）で加工される部品を抽出し，その中で納期を基準に優先的に割付ける．(2) その後その他の部品を納期を基準にして割付ける．このロジックの前提として中日程段階で適切に納期と材入日が設定されている必要がある．また，優先部品（優先機械で加工される部品）とその他の部品（通常部品）を2段階でスケジューリングを行う場合通常部品は，機械の空いたすきまに割付けることとなり，スケジューリング結果は悪くなる．そこで，人手による工程移動や事前割付された場合と同様工順変更，ロット分割，工程分割，工程圧縮等微調整機能を用いてスケジュール結果の改善を図っている．この操作は，人がスケジュールを作成するときの通常の手順である．

5．3　CASS-IIIの機能

CASS-IIIの基本ロジックは，5.2節に示すとおりだが，実際には表3の各種機能を織込み，スケジューリングされる．これらのどの機能を優先するかは実際に人がスケジューリングする手順をベースとして織込まれている．

またスケジューリング結果は，豊富なマンマシンインタフェースにより表示され，スケジュール上の問題点が分かり，その対策の検討が容易にできる．図1，2に出力例を示す．図1は中日程の機械山積みであり，部品の優先グループごとに表示される．

図2は，機械別日程表と工数山積みを示す．このほか，スケジュール全体の状況を一目で把握することのできる納期と完工予定日の隔たりの分布等各種日程改善のための情報を提供することができる．また，納期遅れ部品リストでは遅れた原因となる工程/設備が特定できるようになっており，事前の遅れ対策検討が容易である．

表3　CASS-IIIの主な機能一覧
Functions of CASS-III

機能	機能概要	対象部品	
		単品	ロット
優先機械	この指定された機械の稼働率が高くなるよう優先して割り付けを行う．	○	○
工順変更	後工程の方が早く着手できる場合連続する工程の順序を入れ換える．	○	○
工程分割	加工期間の長い工程の途中に割込んで他の部品を加工するため工程を分割する．	○	−
ロット分割	ロット数が多く加工期間の長い工程の途中に割込んで他の部品を加工するためロットを分割する．	−	○
共加工	複数の部品を途中工程で組合せて一つの機械で加工する．	○	△
連続工程	異なる部品の二つの工程を連続して加工する制約．	○	○
外注工程	スケジューリング対象外の設備での工程（外注工程）がある場合その設備能力を考慮せず，指定時間経過後次工程の加工を開始する．	○	○
一個流し	ロット生産でロットの一部の加工が完了すれば次工程の加工を開始する．	−	○
工程圧縮	ある一定範囲内で工程時間を圧縮することによりスケジュールを飛躍的に改善することができる場合工程時間を圧縮する．	○	○
不良処理	ロット数の多い部品で一定の不良率で不良の発生が見込まれるときに加工時間を不良率に基づき補正する．	−	○
作業能率	標準時間と実績時間との差があるとき加工時間を補正する．	○	○
代替機械	一つの工程で二つまで能率の異なる機械群を指定でき，自動選択する．	○	○
先行段取	部品が次工程に到着する前に次工程の段取りを開始する．	○	○
ロット加工進ちょく	ロット部品で各工程の進ちょく状況が異なる場合工程ごとに残加工個数が指定できる．	−	○
運搬時間	工程間の運搬時間の考慮．	○	○
複数パレット取付	同一部品を複数個一つのパレットに取付けて加工する．	−	○

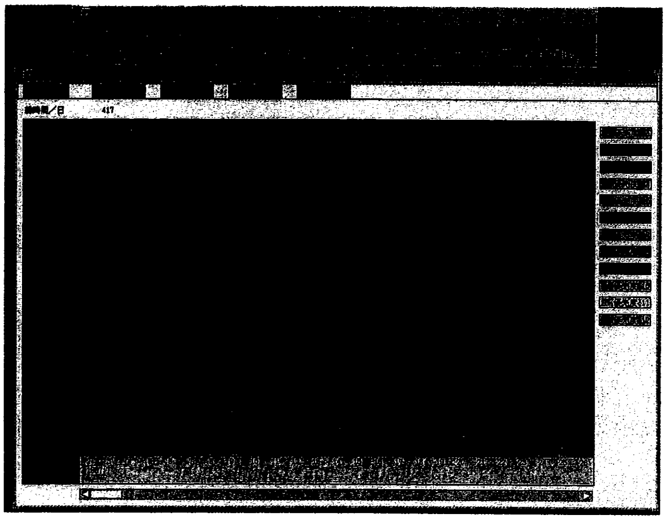

図1　中日程の負荷山積み　中日程計画に基づき機械時間の山積みがなされ，負荷調整を行う．
Machine loading for middle range schedule

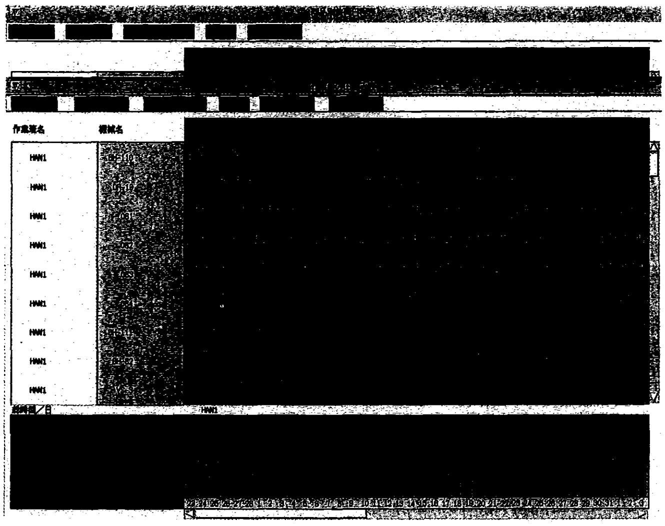

図2　**機械別日程表と工数山積み**　機械別日程表に合わせて工数山積みが表示できる．
Gant chart for machines and manpower loading

6．CASS-Ⅲの適用事例

6．1　対象部品と適用環境

多品種少量生産の典型的な工場である当社三原製作所でのCASS-Ⅲの適用事例を紹介する．当製作所では，製紙機械，紙工機械及び印刷機械を製作している．これらの製品の部品の機械加工ショップにCASS-Ⅲを適用した．機械ショップは対象部品群ごとに6ラインあり，工程当たりの加工時間は約0.5～3hで，各ラインは2か月で3000点弱の部品を加工している．また，CASS-ⅢはCIMシステムの中に位置づけられ，計画⇒作業指示⇒進ちょく実績把握⇒計画のサイクルを回している．そのためCASS-Ⅲ用EWSを各ショップごとに分散配置している．

導入の主な狙いとその期待効果は，次のとおりである．

(1) 納期確保　　組立へのジャストインタイム供給．
(2) 機械稼働率向上　　事前の機械負荷調整と計画の精度向上．
(3) 管理間接業務効率化　　日程表作成時間と生産計画会議の短縮．

6．2　小日程計画の運用

生産管理データは，すべてホスト機で管理されており，最新の進ちょく実績を反映した生産対象部品データを週1回EWSにダウンロードする．受信したデータを基に現場としての納期見直し，特急部品の追加等を行い，スケジューリングを行う．その結果に対して機械の稼働率及び納期に対する進みと遅れをチェックし，機械の変更，外注への振り当てを検討する．検討結果に基づき作業長がデータを修正し，再計算を行い，機械ごとの日程表を先行き2か月分出力する．この運用フローを図3に示す．

6．3　運用上の留意点と今後の課題

システム運用上次の点に注意する必要がある．

(1) 工程データを実態に合わせるための修正．
(2) 標準時間算出精度の向上．
(3) 進ちょく実績のリアルタイム入力．
(4) 部品一つ一つのきめ細かな納期設定．

今後の課題として以下が考えられ，今後これらの実現とともに適用効果の拡大を図っていきたい．

(1) 加工時間算出と進ちょく実績入力の自動化によるデータの精度向上．
(2) 小日程計画の上位生産管理データへのフィードバック．

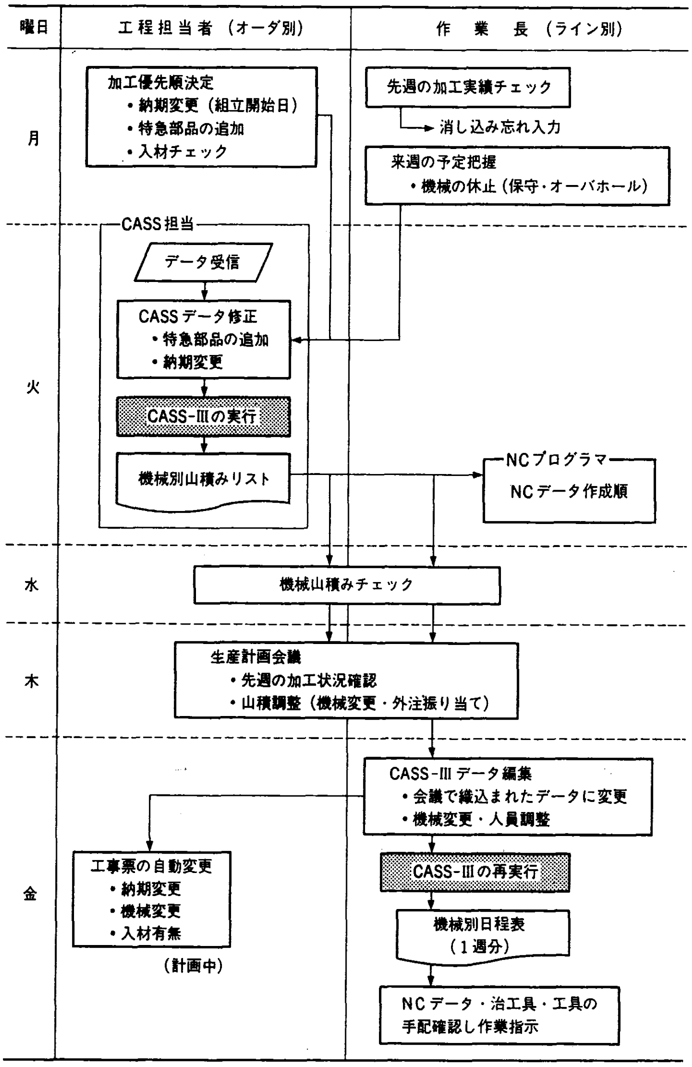

図3　**CASS-Ⅲの運用手順**　日程管理業務の中でCASS-Ⅲが位置づけられ，週のサイクルで運用されている．
Operation flow for CASS-Ⅲ

7．おわりに

機械ショップのスケジューリングに対して現場の経験則を生かした地道な取組みの一事例を紹介した．機械ショップのスケジューリングシステムをうまく活用するにはそれ以前の土壌整備が重要であることを痛感している．またこのようなスケジューリングシステムを使用することによってスケジュールの精度を向上させることができるのはもちろんのこと，その目先の納期遅れに振り回されるのではなく，将来予想される納期遅れに対する対策が立てられるようになることが第一の成果である．また当然のことながらスケジューリング作成の人手が省け，毎日あるいは1日何回でもリスケジューリングを行うことができる．しかし，昨日立てた日程と今日立てた日程にあまりにも差があると人の感覚としてついていけない状況もある．このような数理的な最適性とは違った人の感覚に合ったスケジュールが今後の課題である．

参考文献

(1) 林 達彦，生産能力を無駄なく使うスケジューリングソフト，日経メカニカル 第448号（1995）p.38
(2) 藤井 進，リードタイム短縮のための生産スケジューリングの現状，日本機械学会関西支部第209回講習会 教材（1995）p.9