製造現場における間接作業平準化のための スケジューリングアルゴリズムに関する研究*

則 竹 茂 年^{*1}, 富 永 孝^{*2}

The Study on Scheduling Algorithm for Indirect Work Balancing in Manufacturing Systems

Shigetoshi NORITAKE^{*3} and Takashi TOMINAGA

^{*3} Toyota Central R & D Labs., Inc.,
Nagakute, Nagakute-cho, Aichi-gun, Aichi, 480-1192 Japan

Manufacturing systems usually have some indirect works needed at various cycles. In indirect works, the tool exchange, maintenance, the quality check, the part replenishment, etc. are included. In order to operate the manufacturing system efficiently, it is effective way to make a schedule in consideration of the work load balancing and to operate them without error using work-order cards. We have developed the scheduling algorithm to output appropriate work balance with easiness and steady by taking a heuristics in that longer time task have more influence to the work balance degree. This paper describes the study on the algorithm. In addition, this paper discusses the algorithm that is able to find the meta-parameters values to output the minimum cost schedule.

Key Words: Scheduling System, Work Load Balancing, Indirect Work, Manufacturing System

1. は じ め に

生産システムを正常に運用するためには、日常保全や部品補充、品質チェック、工具交換などの間接的な作業を適切なタイミングで行う必要がある。各間接作業は独自の周期で実施されるため、いくつかの間接作業の実施が一時に集中する場合がある。その際に発生する対応遅れによる生産システムへの悪影響を最小限に留めるため、作業負荷がピークになる時の工数を考慮して作業者数を決めることになる。そのことは、市場競争下における生産システムの原価低減を妨げる一因となっている。

著者らは、生産順序が平準化されている生産システムにおいて間接作業に関する必要作業員数の最少化、および、作業の安定供給を狙い、間接作業を平準化したスケジューリング方式(本論では「間接作業平準化方式」と呼ぶ)を導入した。本方式では、あらかじめ、間接作業を一定の生産量ごとに行うように配分しておき、その決められた生産量をトリガーに作業内容を指

示することで、安定的に間接作業を実施する。ここで、一定の生産量ごとに作業員へ作業指示するために、作業員が1回に行う間接作業項目を記載したカードのことを、本論では「作業指示書」と表現する。また、本論で述べる「作業」はすべて間接作業のことを表す。なお、本論では、作業の平準化において、同じレベルの品質を確保するため工程ごとの品質チェック周期や工具ごとの交換間隔を加工進捗に合わせて一定に保ち、さらに、部品置き場のスペースを節約するため部品ごとの補充間隔も加工進捗に合わせて一定に保っている生産システムを対象としている。すなわち、各作業の間隔を一定加工数に合わせることを制約としている生産システムを対象に最適な間接作業スケジューリングを提供することを狙いとしている。各作業を工具寿命や部品棚最大容量に起因する限界間隔より短く、一定間隔になるように調整するため、過剰作業となるが、作業平準による余剰人員削減のメリットのほうが大きいと考えられることが多い。

間接作業平準化方式の運用に際し、多数ある作業を平準化したスケジュールを作成することはかなり手間がかかる。現状、経験豊富な現場担当者が1日ばかりで作成しており、作成したスケジュールの良否も評価できていない。さらに、多品種の製品を扱う混流ライ

* 原稿受付 2007年3月29日。

^{*1} 正員、(株)豊田中央研究所数理情報研究室(〒480-1192 愛知県愛知郡長久手町長湊)。

^{*2} (株)豊田中央研究所数理情報研究室。
E-mail: noritake@mosk.tytlabs.co.jp

ンにおいては、製品種別に特化した専用工具の交換作業や専用部品の補充、品質チェック作業などの必要頻度が生産比率に応じて変化するため、頻繁に発生する生産比率変更のたびに平準化スケジュールを最初から作成し直さなければならない。また、工具寿命の延命や品質チェック作業の見直し(簡易化)などのカイゼン活動により、条件が変化した場合も再スケジューリングが必要となる。

そこで、著者らは、即座に再スケジューリングすることを可能とした作業負荷の自動平準化スケジューリングシステムを開発した。具体的には、工場で定型的に作成している間接作業用リストや工具データシート(工具情報リスト)を読み込み、作業の分割数を意味する作業指示書枚数や、作業指示書1枚当たりの処理と同期させる生産個数(以降、「基準加工数」とする)等の条件を設定し、数分で平準化スケジュールを作成し、作業指示書として出力できるようにした。その際、作業時間が長い作業ほど全体の平準化度合への影響が大きいことを考慮したヒューリスティクスを取り入れることで、試行しながら利用するユーザが許容できる時間(数分)で、優良なスケジュールを安定的に出力することを可能とした。

本論では、2章と3章で、本論の主題である平準化スケジューリングの前提条件と定式化、および、具体的なスケジューリングアルゴリズムについて説明する。

さらに、著者らが初心者への普及を想定した補足機能として、間接作業の実施頻度に応じた費用(工具費等)を考慮した作業コスト最小化のためのメタ条件、すなわち、適切な作業指示書枚数と基準加工数を自動で見つけるアルゴリズムを開発したので、4章と5章で説明する。そして、6章で簡単な実験例を示し、7章でまとめる。

2. 平準化スケジューリングの 前提条件と定式化

従来、報告されている生産分野におけるスケジューリング研究は生産(加工)順序スケジュールを対象としている報告例が多く⁽¹⁾⁽²⁾、本問題のような生産スケジュールを既与として、保全作業等の間接作業を対象としている報告例は多くない。例えば、工具寿命を統計量として、その最適交換時期を論じている報告例⁽³⁾⁽⁴⁾はあるが、間接作業全体の負荷の平準化を主題とする本研究とは視点が異なる。また、他分野ではあるが類似の定式化が可能な研究事例として、ナース・スケジューリング問題⁽⁵⁾⁽⁶⁾や、鉄道の乗務員割当て問題⁽⁷⁾、

学校時間割自動編成⁽⁸⁾などが報告されているが、これらの手法は対象依存性が強く、制約条件や考慮ルールが異なる本問題へ利用することは困難である。特に、著者らは実用化に重きをおいているため、実用的な時間内で、ある程度良い解を安定的に発見でき、かつ、ユーザに理解しやすい簡単なアルゴリズムであることを重視した。

そこで、本問題に合わせて、独自に定式化することを試みた。その際、各作業要素の1回当たりの作業時間は事前測定や経験値によってあらかじめ確定されているとする。また、移動時間については、各作業指示書に、さまざまな工程の間接作業が満遍なく割当てられることが多く、すべての作業指示書で歩行時間の合計が均一化することが期待できるため、無視できるとした。

ここで、基準加工数はトラブル停止の影響を排除した生産の進捗に同期させるべく、時間ではなく特定設備での加工数とした。特に、中間在庫が多くなり設備間の進捗度合の差を一定数以下に抑えられる場合、ある特定の設備の加工進捗のみをチェックすることで、生産システム内の全設備の進捗とほぼ同期することになる。また、各作業を必要な作業間隔以内で、かつ、作業要素ごとに等間隔することを制約条件とすることは、製品の品質レベルを均一にし、品質管理を容易にするという現場からの強い要望であり、本システムでも採用した。これに関連し、すべての作業指示書を実行した後に1枚目の作業指示書に戻って繰返すため、全作業指示書を一巡するたびに、半端な作業間隔となる作業要素が発生しないように、各作業は、“基準加工数”×“作業指示書枚数の約数”の間隔で行うこととする。例えば、基準加工数1000、作業指示書の枚数が30枚の場合、30の約数は1, 2, 3, 5, 6, 10, 15, 30であるため、各作業は監視設備での加工数が1000, 2000, 3000, 5000, 6000, 10000, 15000, 30000のいずれかの間隔で行うことになる。そのため、例えば、9000回加工できる工具を6000回で交換することになり、使用する工具本数(工具費)が1.5倍になる。このことは、コスト面では大きな損失となり、人件費削減効果とのトレードオフがしばしば議論される。

そこで、約数を多くもち、かつ、対象とする作業の必要作業間隔との差異の総和を小さくする約数を多くもつ値を作業指示書枚数として選択することで、コストのむだを最小限に抑え、本システムによる作業工数の削減や品質均一化の利点を相対的に大きくすることが望まれる。この作業指示書枚数の設定については、作業指示書と作業量の管理上、作業指示書枚数が多す

ざることなく、かつ、作業指示書1枚当たりの作業時間も過剰に長くないように許容範囲を設定した。

一方、必要作業間隔が同じぐらいで、かつ、同一機械、同一内容のセッティングを伴う作業要素の組がある場合、それらを一つの作業としてまとめることで、作業工数が削減し、生産システムへの影響を小さくできる場合がある。そこで、特定の条件を満たした作業要素は同時に作業するという制約を設けた。

以上のことを踏まえ、各作業指示書に割付けられる作業時間の合計を求め、その均一度合を表す目的関数を決めた。以下に定式化について説明する。

最初に、作業ごとにその許容する最大作業間隔を求める。その際、複数種類を生産する混流ラインの場合はその生産比率を反映した値にする。例えば、対象ラインにおいて、1/3の割合で生産(加工)する品種のみに対する専用部品棚への補給作業や、品質チェック作業、専用工具の交換作業に関しては、本来の部品補給間隔や品質チェック間隔、工具寿命を3倍にした値を最大作業間隔とする。

次に、作業指示書枚数を N とし、全作業要素数を W 、任意の作業要素 k の作業時間を t_k とした場合、作業要素 k の最大作業間隔を基準加工数で割った値以下で、 N の約数の最大値 M_k を求める。すなわち、作業要素 k は全 N 枚の作業指示書中、 M_k 枚ごとに1回、等間隔で作業指示されることになる。よって、作業要素 k の作業時間 t_k を作業指示書の $i(i=1\sim N)$ 番めへ割当てた場合を t_{ki} とし、実際に作業要素 k を最初に割当てた指示書番号を $p_k(\leq M_k)$ 番目とする

$$t_{ki} = \begin{cases} t_k & (\text{if } i = p_k, p_k + M_k, p_k + 2M_k, \dots, \\ & p_k + N - M_k) \\ 0 & (\text{others}) \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

となる。次に、各作業指示書に記載されている作業時間の総和を T_i として、

$$T_i = \sum_{k=1}^W t_{ki} \dots\dots\dots (2)$$

を求める。本研究の目的は各作業指示書へ割当てられた作業時間の合計が、すべて作業指示書で均一になることである。そこで、目的関数 G として、 $i=1\sim N$ において、各 T_i の分散を小さくするための関数、

$$G = \min \left\{ \sum_{i=1}^N \left[T_i - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N T_i \right) \right]^2 \right\} \dots\dots\dots (3)$$

を定義した。すなわち、本研究で行う平準化スケジュール問題を $k=1\sim W$ における p_k を制御変数とし、式(3)を目的関数とした最小化問題とした。

3. 作業平準化アルゴリズム

平準化スケジュールを作成する問題は、一般的に、作業要素数に応じて解の候補数が指数的に増大するNP困難な問題であるため、実時間内で最適解、もしくは準最適解を見つけるには、効率的な最適化アルゴリズムの援用が必要となる。例えば、分岐限定法やダイナミック・プログラミング、ラグランジュ緩和法などのような数理計画法や、山登り法や最急勾配法などの逐次探索法、シミュレーテッド・アニーリング法やタブサーチ法、遺伝的アルゴリズムのようなメタヒューリスティクス探索法などがある⁽²⁾。しかしながら、分岐限定法やダイナミック・プログラミングでは組合せ爆発から逃れることはできず、ラグランジュ緩和法を適用できるような定式化は困難である。また、本問題は作業時間が比較的に長い作業要素の作業指示書への割付先(p_k)の変更による目的関数(G)への影響が大きいため、作業時間が長い作業要素の割合によっては超多峰な解空間を有する問題となり、逐次探索手法では得られる解の良否が初期解に大きく依存することが想定される。同様に、メタヒューリスティクス探索法においても最適化度合と収束時間が安定しないことが容易に予想される。

著者らは、一般の工場管理者や計画者への普及のため、実運用上、ユーザの許容時間以内に一定レベル以上の解に収束し、さらに、解の収束過程についてユーザが理解しやすいことを必要要件としたため、本問題においては、上述の最適化アルゴリズムの適用は不適切だと判断した。

そこで、著者らは、最適解を見つけることよりも準最適解を安定して見つけることを優先し、作業時間の長い作業要素から順に p_k 値を決めていくヒューリスティクスを取り入れることで探索空間を限定し、NP困難ではない解空間上で、可能な局所的組合せを全探索して p_k 値を決めていくことで、準最適解を見つけるアルゴリズムを採用した。全体スケジュールへの影響が大きいと思われる作業要素から優先的に探索することで、さまざまな作業要素の入れ替りに頑健な結果を得ることができる。

具体的には、下記の処理手順で平準化を行う。

Step 1: いっしょに作業を行う作業要素をグループ化し、Step 2以降、一つの作業要素として扱う。

Step 2: 全作業要素をその作業時間が長い順にソートし、1から順にナンバリングする($t_1 \geq t_2 \geq t_3 \geq \dots \geq t_k \geq \dots \geq t_w$ となる)。

Step 3: 各作業要素 k に対し、割当てる作業指示書間

隔 M_k を求める (2 章参照)。

Step 4: 作業要素 ($k=1$) の割当指示書番号を $1(p_1=1)$ とし, 式 (1) により, $t_{ki}(i=1\sim N)$ を更新する。

Step 5: $k=k+1$ とし, p_k に 1 から M_k を順に代入し, 式 (1) により $t_{ki}(i=1\sim N)$ の値を更新後, 式 (2) と式 (3) より目的関数 G が最小となる p_k を求める。

Step 6: 全作業要素の p_k が決まるまで, Step 5 を繰返す。

Step 7: 各 $i(i=1\sim N)$ ごとに, t_{ki} が正となる作業要素 k を工程順にソートして指示書番号 i へ書き出す (グループ化した作業要素は分解して記述する)。

以上のアルゴリズムにより, つねに, 優良な作業平準化スケジュール結果を出力できるようにした。

4. 平準化条件の設定

3 章の平準化アルゴリズムにより安定した結果を得ることができるため, 作成するスケジュールの良し悪しは, 指定する作業指示書枚数や基準加工数に大きく依存する。そのため, 作業指示書枚数と基準加工数を適切な値に決めることが重要となる。その際, 重要な評価指標の一つに費用損失がある。特に, 工具交換作

業や検査試験加工などにおける交換品や (人件費換算) 工数のように, 作業回数が費用変化に直接影響する対象の場合, 作業回数の削減が重要な指標となる。

そこで, 費用損失を評価指標として, 作業指示書枚数と基準加工数を決めるアルゴリズムを追加検討した。以降, 説明をわかりやすくするため, 工具費を例に説明する。

工具費の増加 (損失分) は, 工具交換作業をその工具寿命ではなく, 作業指示書の実行タイミングに合うよう等間隔で行うことが原因で発生する。例えば, 基準加工数 1000 において 7000 回加工可能な工具を使った場合, 作業指示書を 60 枚とすると 7000/1000 以下で 60 の約数が 6 であることから, 6000 回 (1000×6) ごとに工具交換することとなる。また, 作業指示書を 100 枚とすると同様に 5000 回 (1000×5) ごとに工具交換することとなる。これらは, 本来の工具寿命をきちんと使い切る場合と比べ, 前者が工具費 7/6 倍, 後者が工具費 7/5 倍となる。

費用損失分を最小にするには全工具の寿命の最小公倍数を基準加工数で割った値を作業指示書枚数とすればよいが, 工具寿命が都合良く揃うことはなく, 通常, 作業指示書枚数が膨大になり管理ができなくなる。表 1 は, 作業指示書枚数の違いによる単位加工製品当た

Table 1 Some examples of the number of card and cost

(a) An example of the case that standard interval is 1000 with 7 cards

No.	Tool Cost (yen)	Tool Life	Available Tool Life	Waste Tool Life	Usage Ratio	Tool Cost / 1000 Products	Loss Cost / 1000 Products
1	6000	2100	1000	1100	48%	6000	3143
2	4000	3500	1000	2500	29%	4000	2857
3	2500	4000	1000	3000	25%	2500	1875
4	1000	5000	1000	4000	20%	1000	800
5	4500	3000	1000	2000	33%	4500	3000
(Sum up)						18000	11675

(b) An example of the case that standard interval is 100 with 46 200 cards

No.	Tool Cost (yen)	Tool Life	Available Tool Life	Waste Tool Life	Usage Ratio	Tool Cost / 1000 Products	Loss Cost / 1000 Products
1	6000	2100	2100	0	100%	2857	0
2	4000	3500	3500	0	100%	1143	0
3	2500	4000	4000	0	100%	625	0
4	1000	5000	5000	0	100%	200	0
5	4500	3000	3000	0	100%	1500	0
(Sum up)						6325	0

(c) An example of the case that standard interval is 1000 with 60 cards

No.	Tool Cost (yen)	Tool Life	Available Tool Life	Waste Tool Life	Usage Ratio	Tool Cost / 1000 Products	Loss Cost / 1000 Products
1	6000	2100	2000	100	95%	3000	143
2	4000	3500	3000	500	86%	1333	190
3	2500	4000	4000	0	100%	625	0
4	1000	5000	5000	0	100%	200	0
5	4500	3000	3000	0	100%	1500	0
(Sum up)						6658	333

りの工具費用と工具ロス費の変化を少数の刃具を例に計算した結果である。表1(a)のように、作業指示書枚数を最小限にすると工具ロス費が大きくなり、表1(b)のように工具ロス費を零になるように作業指示書枚数を設定しようとする、管理が困難な枚数(46 200枚)になる。表1(c)は作業指示書枚数を多すぎず、工具ロス費も小さく抑えた結果となっている。例えば月産1万台の製品における1箇月の工具費は、表1(a)～(c)でそれぞれ180 000円、63 250円、66 580円となり、表1に示す少数工具の例においても工具費の差が3倍程度になる。

以上の例のように、費用の増加を少しでも減らすためには、基準加工数と作業指示書枚数を適切な値に設定しなければならない。しかしながら、一つの生産システムにはさまざまな寿命の工具が多数含まれ、さらに、作業頻度が生産比率により変化するため、適切な条件を想起することが難しい。そこで、工場での適用を容易にするため、基準加工数と作業指示書枚数を適度な値に設定するアルゴリズムを追加開発した。

5. 平準化条件の調整アルゴリズム

以下に、著者が用いた基準加工数と作業指示書枚数の決定方法を説明する。なお、以下の説明では、各作業要素*i*の必要作業間隔(例：工具寿命、部品棚容量)を F_i とし、1回の作業に必要な費用(例：工具1本の費用)を C_i とする。また、 $[x]$ は x 以下の最大整数値とする。

Step 1：全作業要素から最小の必要作業間隔 F_i をもつ作業を選択し、その作業間隔を A とする $[A = \text{Min}(F_i)]$ 。

Step 2：1けたの自然数 a と、非負の整数値 b に対し、 $A \geq a \times 10^b$ を満たす最大の a と b を求める。

Step 3：1以上 a 以下の全自然数 a^* による $a^* \times 10^b$ を基準加工数の候補値集合 $\{S^*\}$ とする。

Step 4：Step 3で求めた、候補値集合 $\{S^*\}$ に含まれるすべての候補値 s^* に対し、以下の式より、作業指示書1枚当たりの理想平均作業時間 T^* を求める。

$$T^* = \sum (T_i \div [F_i / s^*]) \dots\dots\dots (4)$$

Step 5：Step 4で求めた T^* の中で、あらかじめ決められた時間制約内に収まる T^* をとる候補値 s^* を最終的な基準加工数 S^{dec} とする。ここで、 T^* に関する時間制約は、むだな歩行時間の比率が大きくなりすぎないこと、および、作業指示の実施時間における設備稼働率低下と休憩時間への影響を配慮して、経験的に決めた条件である。また、 T^*

が複数ある場合、それぞれの候補値 s^* ごとに求めた

$$Loss = \sum \{(F_i - [F_i / s^*]) \times C_i\} \dots\dots\dots (5)$$

が最も小さくなる s^* を最終基準加工数 S^{dec} とする。

なお、Step 5において、時間制約を満たす s^* がない場合は、設計者へ $\text{Min}(F_i)$ と $\text{Max}(F_i)$ 、総作業時間等の情報とともに適切な解がない旨を提示し、作業指示書で扱う作業内容の範囲変更や条件変更を促す。一般的に、 T^* が小さすぎる場合、総作業時間(作業要素)が少なすぎるか、過度に短間隔の作業が含まれていることが原因であることが多い。また、 T^* が大きすぎる場合、総作業時間(作業要素)が多すぎるか、最小間隔とほぼ同じ間隔の作業が多く含まれていることが原因であることが多い。上記の条件変更を適切な基準加工数 S^{dec} が決まるまで繰返す。

以上のStep 1～5により、半自動的に基準加工数を決定する。

次に、作業指示書枚数を決定する。作業指示書枚数に関しては、管理上、120枚を上限としており、費用損失に関する評価関数を定式化することで、全数(1～120枚)探索を行っても数分で費用損失を最小にする作業指示書枚数を見つけることが可能となる。

費用損失に関する評価関数は、上記Step 1～5で求めた基準加工数 S^{dec} と各作業間隔 F_i に対し、 $[F_i / S^{dec}]$ 以下で、かつ、作業指示書枚数の約数の最大値を K_i^{dec} として、

$$\begin{aligned} \text{評価関数} = & \frac{\sum \{C_i \times (F_i - K_i^{dec} \times S^{dec}) / F_i / K_i^{dec}\}}{S^{dec}} \\ & \times \left(1 + \alpha \frac{N}{120}\right) \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

と定義した。ここで、 α は0～1の値をとる係数であり、ペナルティ項の寄与度合を調整するために用いた。式(6)では、作業要素*i*ごとに、1回作業を行う際に必要となる費用(工具交換作業の場合は、工具1本の費用) C_i に、 $(F_i - K_i^{dec} \times S^{dec}) / F_i$ 、すなわち、可能な最大間隔に対するむだにする間隔の割合を乗じて1回の作業でむだにする損失額を算出した後に、実際の作業間隔 $K_i^{dec} \times S^{dec}$ で割ることで製品1個当たりの損失額とし、その合計を評価値としている。また、ほとんど同じ損失額ならば作業指示書枚数は少ないほうが管理上容易になるため、式(6)中にペナルティ項を追加した。 α はペナルティ項の寄与度であり、経験上0.2をデフォルトとしたが、ユーザが自由に変更することも可能とした。上記式(6)を1～120までのすべての作業指示書枚数の候補値に対し計算すること

で、作業指示書枚数を考慮しながら、費用損失額が小さくなるような作業指示書枚数を得ることができる。

6. 平準化スケジュール作成実験

本システムを機械加工ラインの刃具交換作業を平準化スケジューリングへ適用した事例を図1, 2に示す。ここで、刃具本数200, 作業指示書枚数60である。図1と図2は作業指示書番号を横軸に表し、各作業指示書で行う刃具交換作業時間の合計を縦軸に表している。図1が平準化スケジューリングを行う前の初期状態

態(すべての p_k が1)であり、図2が平準化スケジューリングを行った結果である。ほぼ、すべての作業指示書の作業時間がその平均時間から $\pm 8\%$ 範囲内に収まった。なお、計算時間はPentium II 450 MHz, メモリ256 MBのパーソナルコンピュータで、1分ほどであり、工場併設の低スペックのパーソナルコンピュータ上でも、実運用上、支障がない時間であった。他のデータを用いた実験においても、作業要素数と作業指示書枚数に比例して計算時間が増加する傾向にあるが、実用上、問題がない時間で計算が終了した。

Fig. 1 An example of the test case (before)

Fig. 2 The result of the test case (after scheduling)

本システムで生成したスケジュールの良否を判定すべく、いくつかの事例の入力データと平準化スケジュールリング結果(図3に例示)とその詳細情報を実際の工場のスケジュール作成担当者数名に提示し、本システムの結果より良いスケジュールを作成できるかを確かめさせた。その結果、協力いただいたすべての担当者から、本手法の結果が最良である旨の回答を得ることができた。そのことから、本システムが実用上、有効であることを確認した。

7. まとめと今後

間接作業平準化方式は、生産システム内に含まれるさまざまな間接作業を平準化し、作業指示書へ割付けすることで、あたかも定常作業であるかのようにできる。その結果、作業者のスキルによらず、工数低減だけでなく作業員数を最小化することができる。本方式を効果的に運用するために、作業間隔の拡大等のカイゼン活動や、生産比率変更に柔軟に再スケジュールリングできないという本方式の弱点を補うための平準化スケジュールリングを自動で行うアルゴリズムを開発した。また、本システムを初心者でも簡単に利用できるように、本システムへの入力条件を見つけるためのヒ

ューリスティックスを取り入れたアルゴリズムも併わせて開発した。

本システムは実運用向けに開発してきており、すでに実績を蓄えつつある。

今後は本システムを生産システムシミュレーションとリンクさせることで、

- ・ボトルネックを考慮した間接作業運用方法の検討
- ・故障復旧作業を考慮した作業指示書内の作業順決定方法の検討
- ・本方式の効果予測、入力条件の事前評価
- ・減産時の作業工数削減方法の決定(どれだけ設備を止めても大丈夫か)

などの研究への展開が可能となると考えられる。

また、本システムにおいては、作業負荷を作業時間と等価とみなすことで、時間軸上での作業負荷の平準化を行ってきたが、今後は、身体負荷に相当するウェイトをかけた時間に変換し、また、身体負荷の大きい作業を連続させないという制約条件を組込むことで、身体的負荷の平準化も含めたスケジュールリングシステムへ発展させていくことを検討する予定である。また、生産システムの一部を一時停止させるような間接作業を含む場合には、生産システムの生産能力への影

Fig. 3 The result of another test case

響の最小化という観点から最適化し、生産システムシミュレーションで確認し、場合によっては変更を促すように発展させていく予定である。

本研究を進めるに当たり、多方面からの有益なご意見やご指導をいただいたトヨタ自動車(株)の関連部署・関連工場の皆様に心よりお礼申し上げる。また、本研究の最中、つねにご指導や協力をいただいた(株)豊田中央研究所の数理情報研究室メンバー、および、論文執筆に際し懇切丁寧なご指導をいただいた東京大学の木村文彦教授に心よりお礼申し上げる。

文 献

- (1) Ishibashi, M. et al., A Controlling Method in an Automobile Part Plant (in Japanese), *DENSO Technical Review*, Vol. 9, No. 1 (2004), pp. 133-138.
- (2) Kuroda, M. and Muramatsu, K., *Production Scheduling*, (2002), pp. 164-232, Asakura Publishing Co., Ltd.
- (3) Shimoda, Y. and Sakurai, F., Statistical Tool Replacement Procedures for Automatic Machining Centers (in Japanese), *Journal of Japan Industrial Management Association*, Vol. 45, No. 6 (1995), pp. 555-561.
- (4) La Commare, U. et al., Optimum Tool Replacement Policies with Penalty Cost for Unforeseen Tool Failure, *International Journal of Machining Tool Design Research*, Vol. 23, No. 4 (1983), pp. 237-243.
- (5) Li, L. X. and Benton, W. C., Performance Measurement Criteria in Health Care Organization, Review and future research directions, *European Journal of Operational Research*, (1996), pp. 449-468.
- (6) Ikegami, A. et al., Nurse Scheduling Problem in Japan (in Japanese), *Journal of the Operations Research Society of Japan*, Vol. 41 (1996), pp. 436-442.
- (7) Carpara, A. et al., A heuristic method for the Set Covering problem, *Operations Research*, Vol. 47 (1999), pp. 730-743.
- (8) Yoshikawa, M., Automatic Solver for Class/Teacher/Room Timetable (in Japanese), *Journal of the Operations Research Society of Japan*, Vol. 46 (2001), pp. 461-468.