格子型機械配置生産システムにおける 自律的レイアウト創成機能に関する研究（第1報）*

—計画段階におけるレイアウト創成機能—

貝原俊也** 藤井進** 指尾健太郎** 藤本智子***

A Study on Autonomous Layout Creation Function for Square-Arrayed Machining Cell System (1st Report)
— Layout Creation Function in Planning Stages —

Toshiya KAIHARA, Susumu FUJII, Kentaro SASHIO and Satoko FUJIMOTO

Market trends are rapidly changing, and timely decisions are becoming more crucial and difficult than ever for manufacturing industries. We proposed a manufacturing system named Square-Arrayed Machining Cell System (SAMS) as a feasible and promising system towards this goal. SAMS is aimed to have an autonomous layout ability, which does not need a specific or absolute outside signal indicating changes in the manufacturing circumstances to reconfigure itself. In this paper, we focus on the methodology to facilitate an autonomous layout function in its planning state that realises the specialization and generalization in SAMS, and propose a layout creation function for the SAMS. The characteristics and effectiveness of the proposed methodology are investigated by computer simulation using a model manufacturing system.

Key words: manufacturing system, autonomous system, agile manufacturing, manufacturing scheduling

1. はじめに

消費者の嗜好が多様化し製品のライフサイクルが短命化するにつれ消費者主導のマーケット・インの発想が重要視されるようになってきた¹⁾。そして、このような背景を受けて変種変量生産システムが注目されており、その形態として提案されているのが、格子型機械配置生産システム (Square-Arrayed Machining Cells System, SAMS)²⁾³⁾⁴⁾である。

格子型機械配置生産システムは、FMSの生産品種に対する柔軟性を維持したままその大容量化を図ったHV-FMS(High Volume FMS)⁵⁾の流れを受け、より高度な柔軟性を持たせたシステムとして提案されている。同システムでは、複数の加工設備を格子状に配置し、各加工設備に必要とされる工具を装備し、自律的に加工品種および加工工程を選択することにより柔軟に複数の加工が行える。提案システムのような変種変量生産システムで効率的な生産を行うためには、変化する生産状況に合わせてシステムを再構成することが重要であり、かつその再構成が自律的・容易であることが望ましい⁶⁾⁷⁾。そこで本研究では、格子型機械配置生産システムの計画段階において、変動する生産環境に適応しシステムのレイアウトを再構成する自律的レイアウト創成機能を提案し、その特性評価と有効性の検討を行う。なおここで提案する格子型機械配置生産システムは、現段階ではまだコンセプトレベルであり、本論文では研究の初期段階としていったん抽象的な状況を想定していることをあらかじめ断っておく。

2. 格子型機械配置生産システム

2.1 概要

格子型機械配置生産システムの概念図を図1に示す。

格子型機械配置生産システムでは、加工設備の基本単位をLB>Loading Buffer)とULB(Unloading Buffer)を有するMC(Ma-

Fig. 1 Conceptual Configuration of SAMS

chining Cell) とし、MC を格子状に配置したレイアウトを持つ。システムで加工の対象となるワークは、それぞれ複数の工程 (Organized Processing Group, OP) に分けて加工され、各工程は一つの MC によって加工される。また、一つの工程を MC で加工するのに必要な工具群をその工程の工具セットと呼ぶ。そしてここでは、システムを抽象化し各 MC は適切な加工プログラムと工具セットを備えることによって多種多様な加工が可能になるものと仮定する。加工の際、ジグとしてパレットが使用され、PCS(Pallet Changer Station)においてワークに対するパレットの交換およびワークの洗浄が次の工程のために行われる。

加工対象ワークは、素材倉庫からシステム内へ投入される。格

* 原稿受付 平成 18 年 5 月 11 日
** 正 会 員 神戸大学工学部 (兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)
*** 学生会員 神戸大学大学院

子型機械配置生産システムでは、投入されたワークに対して複数の MC で加工可能であると考えられる。そこで、投入されたワークを加工する MC を決定するために後述するオークション方式を用いた社会的交渉型のスケジューリングが適用される。このようなオークション手法は、PCS において次の工程を加工する MC を決定する場合や、仕掛り在庫の中から次に処理すべきワークを決定する場合にも適用される。なおワークの搬送には、あらかじめ設定された経路を自由に通るランダムアクセス型とした AGV を使用し、台数の制約を考慮せず任意の場所へ搬送できるものとする。

3. オークション方式

3.1 社会的交渉とオークション

商品を売買する際、ある商品を売ろうとする売り手に対してその商品を手に入れたいとする買い手が一人以上いる場合を考えてみる。売り手は、自身の満足度が一番高い価格で商品を引き取ってくれる買い手に商品を売りたいと考える。そこで売り手は、商品を欲しいと思う買い手全員に、商品に対してそれぞれの効用に基づき価格をつけることを依頼する。最終的に、商品に対して売り手が最も満足する価格をつけた買い手にその商品は売られる。このような立場の異なる意思決定主体間の社会的交渉はオークション方式と呼ばれ、オークションを開催しその進行役を務める者を**コーディネータ**という。また、オークションに参加する買い手たちを参加者 (Bidders) と呼び、彼らが商品に対してつける価格を競り値という。

一般に、このようなオークション方式を用いることで、自律分散性が高く、かつ実用的なシステムの構築が期待できる⁸⁾。

3.2 格子型機械配置生産システムにおけるオークション

オークション方式では、商品、参加者、競り値の種類を変えることにより様々な場面に対応することが可能である。格子型機械配置生産システムを運用するにあたりオークションを適用するタイミングとして次のような場面が考えられる。

Case 1: 素材倉庫にてワークが投入された場合

Case 2: PCS にてワークのパレット交換が完了した場合

Case 3: MC にてワークの加工が完了した場合

Case 4: AGV によりワークの搬送が完了した場合

このようなオークション適用の契機となるイベントをオークションのトリガー (Auction trigger) と呼ぶとする。さらにこれらの各ケースで行うオークションは、**システム内を移動するワークと、その処理を行う設備との関係において**

1) ワークが次処理の設備を決定する場合

2) 設備が、待ち行列に入っているワークの中から次に処理するものを選択する場合

の2種類の目的で**大別**することができる。このような観点でオークションを分類した場合、1) を設備選択オークション、2) をワーク選択オークションと呼ぶこととする。

ここで、従来の生産管理方式には、MRP や APS のようにあらかじめ決められた計画に従い上流からワークを投入する Push 型と、JIT のように生産状況に応じて下流から必要なワークを引っ張る Pull 型の二通りのものがあり、通常はそれぞれの特徴を考慮しながら生産状況に応じ意図的に使い分ける必要がある。ここで、上記のオークション区分では、1) が Push 型、2) が Pull 型に相当する。オークション方式では、動的に変化する需要に対応し、この切替えを需給バランスに呼应しながらオークション参加者が自律的に行うことが可能となる。またこの切替えが、社会的交渉を繰り返す間に、自然な形で実施されるという優れた特徴を有していると考えられる⁸⁾。

Table 1 Classification of Auctions used in SAMS

Auction purpose	Auction trigger	Item on auction	Bidder
Gate selection	-Work arrival at Material Warehouse	Work	Gate
MC selection	-Work arrival at Material Warehouse -Changing pallets at PCS completed	Work	MC
AGV selection	-Work arrival at Material Warehouse -Changing pallets at PCS completed -Processing at MC completed	Work	AGV
PCS selection	-Processing at MC Completed -Work transportation by AGV completed	Pallet	PCS
Work selection	-Changing pallets at PCS completed -Processing at MC Completed -Work transportation by AGV completed	MC, AGV, PCS	Work in queue

ここで、**表 1** に格子型機械配置生産システムの運用のために提案されてきたオークションについて、オークションの目的、適用時期 (トリガー)、商品と参加者をまとめる。現在、設備選択オークションは 4 種類提案されており、これらは投入口選択オークション、MC 選択オークション、AGV 選択オークション、PCS 選択オークションである。

本論文では、オークションに関連する行為の主体として、(1) オークションの開催を依頼する側、(2) オークションを開催する側、と大別し、さらに (1) は、(1-1) システム内を移動する側 (ワーク、パレット)、(1-2) システム内で処理を施す側 (MC、AGV、PCS)、に分類する。ここで提案するオークション法は、これらの間でのやりとりが基本となる。また、上記 (2) のオークションを開催する主体がコーディネータであり、例えばシステム全体を統制する管理コンピュータがこれに該当すると考えてよい。さらに本論文では、オークションの実行にかかる時間はトリガーの発生時間間隔に比べて十分に短い状況を想定し、コーディネータは複数のトリガーを同時に受け取ることはないものとする。

本論文では、格子型機械配置生産システムの中で特に重要な役割を果たしている MC 選択オークションとワーク選択オークションを取り上げ説明する。

3.3 MC 選択オークション

MC 選択オークションは、システム内で多数存在する MC の中からワークの次の工程を加工する MC を決定するときに適用されるオークションである。ここで、システム内のトリガーは、システム全体を統制する管理コンピュータにより常に監視されており、ワークが素材倉庫において投入されたときとワークのパレットの交換が PCS において完了した時点で、それぞれワークとパレットから設備を経由しコーディネータである管理コンピュータにオークションのトリガーが出され (Table 1)、この場合、商品はワーク、参加者は MC となる。

3.3.1 MC 選択アルゴリズム

以下に MC 選択アルゴリズムの流れを示す。

Step 1: 加工可能なワークが素材倉庫あるいは PCS に到着し、MC 選択オークションのトリガーを発生

Step 2: トリガーを感知したコーディネータはすべての MC に対してワークの情報を提示。ここでの情報とはワーク種類、加工工程、現在の位置、返答すべき競り値の種類である

Step 3: 各 MC はワークを加工する工具セットを所持しているかを判断, そうでなければオークションへの参加を辞退

Step 4: 各 MC は提示された情報に対して競り値を決定し, コーディネータに競り値を返答

Step 5: コーディネータは競り値を調べ, すべての MC が割り当て不可能であれば **Step 6** へ, そうでなければ **Step 7** へ

Step 6: コーディネータはワークへ不成立を通知するとともに, ワーク情報を自身の持つ MC の待ち行列リストへ追加

→ **アルゴリズム終了**

Step 7: コーディネータは返答された競り値を比較, 最も高い競り値を返答した MC が 1 台だけであればワークをその MC に割り当て, オークションを終了→**アルゴリズム終了**
競合が生じた場合は **Step 8** へ

Step 8: 返答された競り値が用意されている最後の競り値であれば, ワークを競合が生じている MC の中からランダムに割り当て, オークションを終了→**アルゴリズム終了**
そうでなければ, コーディネータは優先順位に従い競り値の種類を変え, オークションの参加者を競合を起こしている参加者に絞り込んで再入札を依頼し **Step 4** へ

3.3.2 MC 選択オークションの競り値とその算定方法

MC 選択オークションにおいて用いられる競り値について以下に示す. なお, 競り値の並びはその優先順位を表す.

競り値 1 《MC の空き状態》

MC がワークによって占有されている度合いを表す. 競り値を(*)で示す. これは制約条件とも見なすことができる.

- ・ LB と MS がともに空いている (2)
- ・ LB だけが空いている (1)
- ・ LB と MS がともに占有されている (-1)

競り値 2 《搬送距離》

ワークの現在位置から MC までの距離を競り値として与える. 値が小さいほど良い競り値になる.

競り値 3 《進行方向》

ワークの現在位置から MC までの搬送経路が素材倉庫から完成品倉庫に向かうワークフローの流れに沿っているかを表す.

- ・ 完成品倉庫の方向 (2)
- ・ 垂直方向 (1)
- ・ 素材倉庫への方向 (0)

3.4 ワーク選択オークション

ワーク選択オークションは, 設備の空きを待つ待ち行列の中に入っているワークの中から次に処理すべきワークを選択するときに適用されるオークションである. 表 1 に示されるとおり, ワーク選択オークションは MC, PCS, AGV などの設備がその処理を完了したときに開催され, 商品は設備, 参加者はワークとなる. やはりコーディネータである管理コンピュータによりトリガーは常に監視され, トリガーが検知された場合にオークションが始動する.

3.4.1 ワーク選択アルゴリズム

Step 1: 設備が処理を終了し, オークションのトリガーを発生

Step 2: トリガーを感知したコーディネータはオークションを要請した設備について, 自身の内部にもつ待ち行列リストに入っている全ワークに対し設備の情報を提示

Step 3: 各ワークは設備が自身を処理する能力を持っているかを判断し, そうでなければオークションへの参加を辞退

Step 4: 各ワークは提示された情報に対して競り値を決定し, コーディネータに競り値を返答

Step 5: コーディネータが自身の待ち行列リストに入ってい

る全ワークについて処理を行うことができないと判断した場合 **Step 6** へ, そうでなければ **Step 7** へ

Step 6: 設備へ不成立を通知→**アルゴリズム終了**

Step 7: コーディネータは返答された競り値を比較, 最も高い競り値を返答したワークが一つだけあればそのワークを設備に割り当てオークションを終了→**アルゴリズム終了**
競合が生じた場合は **Step 8** へ

Step 8: 返答された競り値が用意されている最後の競り値であれば競合が生じているワークの中からランダムに選択→**アルゴリズム終了**

そうでなければ, コーディネータは優先順位に従い競り値の種類を変えオークションの参加者を競合を起こしている参加者に絞り込んで再入札を依頼し **Step 4** へ

3.4.2 ワーク選択オークションで用いる競り値

3.3.2 項と同様に競り値の並びはその優先順位を表す.

競り値 1 《待ち時間》

ワークが待ち行列の中で待機した時間を直接競り値として与える. 値が大きいほど良い競り値となる.

競り値 2 《搬送距離》

ワークの現在位置から設備までの距離を直接競り値として与える. この値が小さいほど良い競り値になる.

4. 自律的レイアウト創成機能

格子型機械配置生産システムのような変種変量生産システムで効率的な生産を行うためには, その時々での生産状況に合わせてシステムを再構成, すなわちシステムの機能を必要十分な状態に限定しながら運用していくことが重要になる. 適切にレイアウトを再構成することにより得られる効果としては, 所持工具数の抑制やワークフローの自律的な形成などが挙げられる. すなわち, 格子型機械配置生産システムの自律的レイアウト創成機能は, 動的・不透明な生産環境に適応し, 自律的にシステムのレイアウトを生産状況に見合った形に再構成することを可能にするための機能である.

格子型機械配置生産システムにおけるレイアウト設計を考えた場合, MC, PCS などの処理設備の配置, AGV の搬送経路などが考えられるが, その第一歩として, 本研究におけるレイアウトは, システム計画段階における 1) MC の位置, 2) 各 MC の工具配置, の二つを対象とする.

4.1 計画段階におけるレイアウト創成機能

システムの設計段階において, 生産すべき製品の品種および生産量が既知である場合を考える. 生産状況に見合ったシステムのレイアウトを導出するにあたって, 必要になる MC の台数およびそれぞれの MC の工具配置を決定する必要がある. そこで, 初期状態としてシステム内にすべてのワークの全工程の工具セットを備えた MC が十分に存在するような状況を想定し, シミュレーション実験を利用し MC 台数および工具セット数を減らしていくことによって最終的に適切なレイアウトを導き出すレイアウト創成アルゴリズムを提案する.

4.1.1 生産条件

計画段階におけるレイアウト創成アルゴリズムは, シミュレーションを利用してレイアウトの導出を図るアルゴリズムである. ここでの生産条件は次の指標で与えられる.

規定稼働時間 (Allowable Makespan) T^*

目標生産個数 (Goal Production Volume) N_{goal}

設定稼働率 (Planned Utilization) U_M^*

規定中間在庫量 (Regulated WIP) S_P^*

4.1.2 評価パラメータ

レイアウト創成アルゴリズムの中で使用するシミュレーションにより得られる評価パラメータを次のように定義する。なお、ここで用いる記号は以下のとおりである。

品種 i のワーク: $Work-i \quad i \in W = \{1, 2, \dots, n_W\}$

Work- i の工程番号の順序集合: $O_i = \{1, 2, \dots, n_{O_i}\}$

j 番目の工程: $OP-j \quad j \in O = \bigcup_{i \in W} O_i$

Work- i の OP- j : $Work(i, j) \quad i \in W, j \in O_i$

Work(i, j) の工具セット: $Toolset(i, j) \quad i \in W, j \in O_i$

k 番目の MC: $MC_k \quad k \in M = \{1, 2, \dots, n_M\}$

ℓ 番目の PCS: $PCS_\ell \quad \ell \in P = \{1, 2, \dots, n_P\}$

m 番目の AGV: $AGV_m \quad m \in A = \{1, 2, \dots, n_A\}$

- ・システムの総稼働時間 ($C_{\max}$): 目標生産個数のワークを処理するのに必要とした時間
- ・ MC_k における総加工時間 (PT_k): MC_k において, MS で加工処理を行った時間総和

$$PT_k = \sum_{i \in W} \sum_{j \in O_i} pt_{i,j} \text{Processed}(i, j)_k \quad k \in M \quad (1)$$

ただし, p_{ij} : Work(i, j) を加工するのに要する時間

$\text{Processed}(i, j)_k$: MC_k における Work(i, j) の総加工数

- ・ MC_k の稼働率 (U_k): システムの規定稼働時間における MC_k の総加工時間の割合

$$U_k = \frac{PT_k}{T^*} \quad k \in M \quad (2)$$

- ・MC の平均稼働率 ($\bar{U}_k$): システム内全 MC の平均稼働率

$$\bar{U}_k = \frac{1}{n_M} \sum_{k \in M} U_k \quad k \in M \quad (3)$$

- ・ PCS_ℓ における中間在庫量: ($S_\ell \quad \ell \in P$)
- ・ PCS_ℓ における最大中間在庫量: ($\max\{S_\ell\} \quad \ell \in P$)
- ・ $Toolset(i, j)$ の削減可能性 ($D\text{-Allowance}(i, j)$): $Toolset(i, j)$ を削減してもシステムに支障をきたさないかを表す。

$D\text{-Allowance}(i, j) = 0$ のとき $Toolset(i, j)$ は削減できない。

ここで, レイアウト創成アルゴリズムは大きく 2 段階に分かれている。第 1 段階では与えられた初期レイアウトからの MC 台数の削減を行い, レイアウトの大略を決定する (MC 削減アルゴリズム)。第 2 段階では残った MC への工具配分を現存する工具セットから数を絞り込んでいくことによって決定する (工具セット削減アルゴリズム)。

4.2 MC 削減アルゴリズム

Step 1: 与えられたレイアウトの工具セット削減可能性を判定する。全ての工具セットが削減不可能, すなわち

$$D\text{-Allowance}(i, j) = 0 \quad \forall i \in W, \quad \forall j \in O_i \quad (4)$$

ならば**アルゴリズム終了**。そうでなければ, 削減不可能な工具セット ($\{Toolset(i, j) | D\text{-Allowance}(i, j) = 0\}$) を持つ MC を削減対象からはずして **Step 2** へ

Step 2: 与えられたレイアウトにシステムを設定し, 目標生産個数 N_{goal} までシミュレーションを行い, 加工履歴を取得

Step 3: 加工結果が以下の制約条件を満足するか判定

- (1) 目標生産個数のワークがすべて規定稼働時間内に加工
- (2) MC の平均稼働率が設定稼働率以下
- (3) PCS の中間在庫量が規定量を超過していない
($\max\{S_\ell\} < S_P^*, \quad \forall \ell \in P$)

これらの一つでも満たしていない項目があれば, **Step 5** へ。そうでなければ **Step 4** へ

Step 4: 一度も稼働しなかった MC をレイアウトから削減し, 削減不可能な工具セット ($\{Toolset(i, j) | D\text{-Allowance}(i, j) = 0\}$) を持つ MC を削減対象からはずす。さらに稼働率の最も低い MC を削減してレイアウトを更新し, この MC の情報を記録 (削除対象 MC が複数の場合はランダムに 1 台を選択) して **Step 1** へ

Step 5: MC の情報が退避されていた場合, その MC をもとあった場所に復帰→**工具セット削減アルゴリズム**へ

4.3 工具セット削減アルゴリズム

工具セット削減アルゴリズムでは, 工具セットを削減していくにあたって第 1 工程 (OP-1) の工具セットから工程順に絞込みを行う。これは, 後の工程用の工具セットを先に削除することにより工具セットを削除した工程がボトルネックとなり, 中間在庫が増加してしまう恐れがあるためである。

Step 1: 削減対象工程 $j := 1$, ループ回数カウンタ $\lambda := 1$

Step 2: 与えられたレイアウトの工具セット削減可能性を判定。全ての工具セットが削減不可能, すなわち

$$D\text{-Allowance}(i, j) = 0 \quad \forall i \in W, \quad \forall j \in O_i \quad (5)$$

ならば**アルゴリズム終了**。そうでなければ, 削減不可能な工具セット ($\{Toolset(i, j) | D\text{-Allowance}(i, j) = 0\}$) を削減対象からはずして **Step 3** へ

Step 3: 与えられたレイアウトにシステムを設定し, 目標生産個数 N_{goal} までシミュレーションを行い, 加工履歴を取得

Step 4: 加工結果が以下の制約条件を満足するか判定

- (1) 目標生産量が規定稼働時間内に加工 ($C_{\max} \leq T^*$)
 - (2) PCS の中間在庫量が規定在庫量を超過していない
- どちら一つでも満たしていない項目があれば, **Step 6** へ。そうでなければ **Step 5** へ

Step 5: 一度も使用されなかった工具セットを削減。削減不可能な工具セット ($\{Toolset(i, j) | D\text{-Allowance}(i, j) = 0\}$) を持つ MC を削減対象からはずす。さらに OP- j の工具セット $Toolset(*, j)$ のうち, 最も使用回数の少ないものを削減してレイアウトを更新し, この工具セットの情報を記録しておく。(削除対象の工具セットが複数存在する場合はランダムに 1 セットを選択) **Step 2** へ

Step 6: 工具セットの情報が退避されていた場合, その工具セットをもとあった MC に復帰。工程 j が最終工程である場合, すなわち

$$j = N_{OP} = \max_{i \in W} \{n_{O_i}\} \quad (6)$$

であれば $\lambda := \lambda + 1$ として **Step 7** へ。そうでない場合は $j := j + 1$ として **Step 2** へ

Step 7: ループ回数カウンタが規定ループ回数 N_{loop} であれば**アルゴリズム終了**。そうでなければ $\lambda := 1$ として **Step 2** へ

5. シミュレーション実験

本章では, 与えられた生産条件に対する自律的なレイアウトの創成をシミュレーション実験により確認する。なおここでは, 予備実験の結果, 提案法の特性に最も強い影響があった規定中間在庫量の設定を変化させて実験を行う。

5.1 実験条件

本論文のシミュレーション実験条件を以下に示す。

- 1) 目標生産個数: 30,000 個 ($N_{goal} = 30,000$)
- 2) 加工設備
規定稼働時間: 480 時間/月 ($T^* = 480$ [hour])
設定稼働率: 85% ($U_M^* = 0.85$)

Table 2 Processing Times for each OPs (pt_{ij}) [sec]

group	OP-1	OP-2	OP-3	OP-4	OP-5
Work-1	345	330	515	240	480
Work-2	275	300	350	195	360
Work-3	435	210	365	240	480

3) ワークの種類と加工時間

ワーク種類: Work-1, Work-2, Work-3 の 3 種類 ($n_W = 3$)

工程数: 全ワーク種類で 5 工程 ($n_{O_i} = 5, \forall i \in W$)

加工時間: 加工時間 (pt_{ij}) は表 2 に従う

基本生産比率: Work-1: 45%, Work-2: 20%, Work-3: 35%

素材倉庫からのワーク投入順と投入間隔: 基本生産比率に

従うランダム投入, サイクルタイム (T_{cycle} とする) ごとにシステムへ投入

サイクルタイム (T_{cycle}): 規定稼働時間と目標生産個数, 加工設備の設定稼働率から次の式により算出する

$$T_{cycle} = \frac{T^*}{N_{goal}} \times U_M^* \quad (7)$$

すなわち $N_{goal} = 30,000$ のとき $T_{cycle} = 49.0$ [sec]

4) 加工対象ワークの規定中間在庫量: 次の 2 通りで設定

実験 1: 各 PCS(4 台配置) において 40 個 ($S_P^* = 40$)

実験 2: 各 PCS(4 台配置) において 20 個 ($S_P^* = 20$)

5) 初期状態

初期 MC 台数: MC が横に 6 台, 縦に 12 台の計 72 台

初期工具セット: 各 MC はすべてのワークのすべての工具セットを備えているものとする. よって, システム内の初期工具セットの総数 ($n_{toolsets}$) は 1080 となる

6) アルゴリズムのパラメータ

規定ループ回数: 5 回 ($N_{loop} = 5$)

5.2 実験 1: 規定中間在庫量 40 個のケース

表 3 (a) に規定中間在庫量を 40 個に設定した場合 ($S_P^* = 40$) のレイアウト創成の結果を示す. 表に示されているのは, レイアウト創成アルゴリズムにおいてレイアウトが得られるまでに必要だった生産シミュレーションの試行回数 (n_{sim}), 得られたレイアウトの MC 台数 (n_M) と工具セット数 ($n_{toolset}$) の内容である. 表の中で太字で示しているのが, 合計 20 回の計画段階におけるレイアウト創成実験の試行で得られたレイアウトのうち, 最も工具セット数が絞られたレイアウトと最も工具セットが多く残ったレイアウトの結果である. また, 表 3(b) に規定中間在庫量を 40 個に設定した場合に得られたレイアウトにおける品種別の工具セット配分を示す.

まず表 3(a) を見ると, この生産条件では 20 回のレイアウト創成実験において, いずれの場合も MC が初期の 72 台から 35 台に, また工具セットが初期の 1080 から 45 前後まで十分かつ安定的に絞り込めていることが分かる. 次に表 3(b) に示される工具セットのワーク品種別の比率を見ると, 20 回すべての試行において, 基本生産比率 (P-Ratio(1) = 0.45, P-Ratio(2) = 0.20, P-Ratio(3) = 0.35) とほぼ近い値を自律的に獲得していることがわかる.

また, この生産条件下において得られた最終レイアウトと工具配分の様子を図 2 に示す. ここで, この図において各 MC は 3×5 の 15 個の正方形の集まりで表され, その 15 個の正方形の 1 つ 1 つが工具セットの所持状況を示している (図 3 参照). 15 個の集まりの向かって上の行から Work-1, Work-2, Work-3, 左側から OP-1, OP-2, ..., OP-5 の工具を表す (■ (色有り): 工具セットあり, □ (色無し): 工具セットなし).

以上より, この生産条件下では, 計画段階におけるレイアウト創成機能により, 与えられたワークの生産比率に従った工具配分

Table 3 Simulation Results : Planning Stage of SAMS ($S_P^* = 40$)

(a) $n_{sim}, n_M, n_{toolset}$

	n_{sim}	n_M	$n_{toolset}$
1	468	35	44
2	457	35	48
3	455	35	49
4	453	35	43
5	459	35	48
6	442	35	54
7	448	35	51
8	447	35	46
9	460	35	43
10	460	35	46
11	454	35	44
12	445	35	45
13	459	35	45
14	443	35	44
15	466	35	45
16	449	35	44
17	453	35	46
18	466	35	43
19	460	35	47
20	459	35	44
Ave.	455.15	35	45.95
Max	468	35	54
Min	442	35	43
S.D.	7.64	0	2.87

(b) Toolset ratio

	Toolset Ratio		
	Wk-1	Wk-2	Wk-3
1	0.477	0.205	0.318
2	0.458	0.188	0.354
3	0.449	0.184	0.367
4	0.442	0.209	0.349
5	0.479	0.188	0.333
6	0.463	0.204	0.333
7	0.451	0.196	0.353
8	0.457	0.196	0.348
9	0.465	0.186	0.349
10	0.457	0.196	0.348
11	0.455	0.205	0.341
12	0.444	0.200	0.356
13	0.467	0.200	0.333
14	0.455	0.227	0.318
15	0.467	0.178	0.356
16	0.477	0.205	0.318
17	0.457	0.196	0.348
18	0.465	0.209	0.326
19	0.447	0.213	0.340
20	0.455	0.182	0.364

Fig. 2 Created Layout : Planning Stage of SAMS

レイアウトを自律的に創成するのに成功していると考えられる.

ここでこの確認のため, このレイアウトに至るまでのレイアウト創成の様子と, そのレイアウトで生産シミュレーションを行った場合のメイクスパンの値を図 4 に示す. この図において, レイアウト創成の初期の段階ではすべての $Work(i, j)$ に対する工具セットが一律に削減されており, MC 削減アルゴリズムによって削減されている MC 台数の分だけ各 $Toolset(i, j)$ も 1 セットずつ削減されているのがわかる. 初期レイアウトよりレイアウト創成を開始してからずっと同じような値を取っていたメイクスパンが 20 時間ほど長くなるのがアルゴリズムが MC 削減アルゴリズムから工具削減アルゴリズムへと切り替わった時である. このとき, メイクスパンはまだ規定稼働時間 ($T^* = 480$) に対して余裕を持っており, その後しばらく工具セット削減アルゴリズムによる工具削減が続いている. Count が 410 を超えたあたりから行き過ぎた工具削減のためメイクスパンが規定稼働時間を超えてしまう状況 (制約違反) が発生し, 工具の復帰を行いながら最小の工具セットに収束していく様子が見られる.

Fig. 3 Legend of Layout Diagram

Fig. 4 Planning Stage of SAMS ($N_{goal} = 30,000$, $S_P^* = 40$)

Table 4 Simulation Results : Planning Stage of SAMS ($S_P^* = 20$)

(a) n_{sim} , n_M , $n_{toolset}$				(b) Toolset ratio			
	n_{sim}	n_M	$n_{toolset}$		Toolset Ratio		
					Wk-1	Wk-2	Wk-3
1	273	35	314	1	0.408	0.252	0.341
2	268	35	326	2	0.383	0.261	0.356
3	248	35	343	3	0.382	0.268	0.350
4	359	35	234	4	0.423	0.222	0.355
5	255	35	339	5	0.375	0.265	0.360
6	278	35	315	6	0.422	0.235	0.343
7	379	35	223	7	0.439	0.211	0.350
8	225	35	366	8	0.407	0.240	0.352
9	299	35	300	9	0.400	0.260	0.340
10	344	35	253	10	0.427	0.217	0.356
11	460	35	43	11	0.442	0.209	0.349
12	504	35	44	12	0.455	0.205	0.341
13	511	35	46	13	0.478	0.196	0.326
14	460	35	53	14	0.453	0.208	0.340
15	222	35	368	15	0.370	0.280	0.351
16	369	35	228	16	0.421	0.232	0.346
17	292	35	304	17	0.408	0.234	0.359
18	292	35	299	18	0.401	0.244	0.355
19	308	35	281	19	0.409	0.231	0.359
20	311	35	284	20	0.444	0.222	0.335
Ave.	332.85	35	248.15				
Max	511	35	368				
Min	222	35	43				
S.D.	89.20	0	111.24				

5.3 実験2：規定中間在庫量20個のケース

ここでは規定中間在庫量を20個に削減し、よりきつい制約条件下で同様の実験を行った。前節と同様に、表4(a)と(b)にレイアウト創成の結果と品種別の工具セット配分を示す。

この結果を表3と比較すると、最終的なMC台数に差はないが工具セットの絞り込みが不安定になることが分かる。また、工具セットが十分に絞り込まれたときには工具セットのワーク品種別の比率が基本生産比率に近くなるが、絞り込みが不足の時には比率が等分に近づき、MCの汎用性を重視したレイアウトになっていることが分かる。

このようにシステム内に工具セットが多数残るようなレイアウトが創成される原因としては、工具セット削減アルゴリズムの実行中にある特定の工程に対する工具セットの削りすぎが発生した場合、その工具セットの不足がボトルネックとなり後工程の工具セットを少しでも削減すると各PCSにおける中間在庫量が規定中間在庫量を超え、それ以上の工具削減が不可能になる状況が発生してしまうためであることが分かった。この時のレイアウト創成の一例を図5に示す。

5.4 考察

以上の実験より、格子型機械配置生産システムの計画段階において、MCの削減および工具セットの削減のみで生産状況に見合った適切なレイアウトを創成するためには、規定中間在庫量を生産状況に合わせた適切な値に設定することが重要であり、換言すると、適切な規定中間在庫量の下では、自律的なレイアウト

Fig. 5 Planning Stage of SAMS ($N_{goal} = 30,000$, $S_P^* = 20$)

ト創成が十分可能であることが確認できた。

その際、ワークの目標生産個数に対して規定中間在庫量が少ない場合、計画段階におけるレイアウト創成機能で自律的に導出されるレイアウトは汎用性の高い加工設備を持つものとなり、逆に目標生産個数に対して規定中間在庫量に余裕がある場合には加工対象ワークの生産比率に沿った専用性の高い加工設備を持つレイアウトになることが判明した。この結果、このような設定で計画段階におけるレイアウト創成機能を用いる場合には、レイアウト創成を複数回行い適切なレイアウトを選択することが重要であることが明らかになった。

なお本論文では、紙面の都合上、数多くの実験結果についてその一部のみの説明となっていることをご理解頂きたい。

6. おわりに

本論文では、まず変種変量生産を可能とする格子型機械配置生産システムについて説明した後、本論文で提案する社会的交渉の一つであるオークションの考えに基づいたスケジューリング法と自律的レイアウト創成機能について説明を行った。そして、シミュレーション実験により提案法を解析した結果、適切な生産状況下において自律的なレイアウト創成が可能であること、およびワークの目標生産個数に対する規定中間在庫量の設定が重要となることを示した。今後の課題としては、レイアウト創成機能の運用段階への拡張などが挙げられる。

参考文献

- 1) 藤本英雄, 変わる生産のしくみ, オーム社, (1994).
- 2) 藤井進, 貝原俊也, 藤本智子: 格子型機械配置生産システムにおける自律的レイアウト創成に関する研究, 精密工学会 2004 年度関西地方定期学術講演会講演論文集, (2004) 61.
- 3) 藤井進, 貝原俊也, 指尾健太郎, 藤本智子: 格子型機械配置生産システムにおける自律的レイアウト機能に関する研究, 2005 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2005) 635.
- 4) S. Fujii, T. Kaihara, K. Sashio and S. Fujimoto: A Study on Autonomous Layout Planning Algorithm for Machining Cells, Advances in Production Management Systems 2005 (CD-ROM), IFIP 5.7, (2005).
- 5) ヤマザキマザック, 変種変量生産システム技術に関する研究報告書, 製造科学技術センター, (1997).
- 6) 上田完次, 生物指向型生産システム, 工業調査会, (1994).
- 7) 岩村幸治, 谷水義隆, 杉村延広: ホロニック生産システムにおけるリアルタイムスケジューリングに関する研究, 日本機械学会論文集 C 編, 69, 682, (2003) 269.
- 8) 藤井進, 貝原俊也, 指尾健太郎, 横瀬淑子, 林伸広: オークション方式を用いたセル生産システムの自律的運用法に関する研究, 2005 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2005) 631.