

# 生産と物流のジャストインタイム・スケジューリング研究に関する現状

## A Review of Just-In-Time Scheduling for Production and Logistics

田村 隆善\*

Takayoshi TAMURA

**Abstract:** The Just-In-Time (JIT) production has been developed as a subsystem of the "whole" Toyota production system (TPS). Currently JIT or JIT production means the TPS especially in foreign countries. It is recognized that JIT is a key concept for enterprises competing in the diversified-products market. The technologies used in JIT are comprehensive and include technologies to design, install and control a production system, which are classified into three categories: hardware, information and software technologies. The software technology consists of ones for production planning/scheduling and shop control. In this paper, the concept and importance of JIT are discussed and then JIT researches related to technology of planning/scheduling for production and logistics are reviewed.

### 1. はじめに

最近、ジャストインタイム(JIT)の話題は下火になっているようであるが、そのコンセプトは、生産と物流のシステム(ハードとソフトの両方を含む)を設計・製作し、運用する上で参考になる普遍的要素を含んでいて大切である。JITの実現は、段取り時間の短縮や小回りのきく設備の開発といったハード、必要なもの(品種)・量・時期が分かる情報システム、ならびにスケジューリングのような運用技術の3つによって支えられよう。こういったJITのコンセプトを私見も交えながら検討した後で、JITスケジューリングに関する数理モデルについて、主としてこれまでに公表されている研究成果を紹介する。

### 2. JITの意味

#### 2.1 計画は守られない

ジャストインタイムはもともと、自動車の生産に「必要な部品やユニットを、必要なときにそのつど、必要なだけ」組立ラインのわきに供給する

システムとして開発された。「必要なものを、必要なときに、必要なだけ」供給したり調達することが全社的に実現されれば、在庫をゼロに近づけることができる。それは、生産管理の面からいってひとつの理想状態である。しかし、自動車のように何千種類もの部品から成り立っている製品では、それらすべての部品を生産計画・スケジューリングによってジャストインタイムに調達することは至難の業であったと思われる[1:p.9]。なぜなら、1種類の部品でも納期通りに納入されなければ、自動車の組み立てができないからである。

生産計画・スケジュールが変更される要因は無数にある。予測の狂い、受注変更、設計変更、事務管理上のミス、不良とその手直し、設備故障、作業者の欠勤などである。これらの要因によって、前工程で問題が発生すれば、後工程では欠品が生じる。それらの結果、一方では欠品がありながら、不要不急な部品や仕掛品の在庫がたまるという事態が生じ、生産の効率を低下させることとなる。そこで、「必要なものを、必要なときに、必要なだけ」各工程が供給を受けるというJITの条件を実現するために採用された方式は、後工程が前工程へ必要なものを必要なときに、必要なだけ引き取りに行く「後工程引き取り方式」

\*愛知工業大学工学部 経営工学科(豊田市)

であり、前工程は、使われた分だけ作る「後補充方式」である。これは、生産計画を各工程に指示するのでもなく、前工程が後工程へ品物を供給するシステムでもない。

このアイデアは、アメリカのスーパーマーケットからヒントを得たといわれる[大野:p.50]。スーパーマーケット側は、顧客がいつ何を買いに来てもよいように、品物を揃えておかなければならない。しかし、この方法で真っ先に直面した最大の問題は、後工程が同じ部品を一度に大量に引き取るために前工程が混乱することであったという。その解決のために採用されたアイデアは、「平準化生産」である。これは、小ロット生産や一個流し生産といったハードならびに平準化生産計画や製品投入計画にみられるソフトの両面を含む。

ここでの JIT (オリジナルな JIT) は、以下のようにその性質を要約できる。

- (1) 後工程引き取り・後補充方式である。
- (2) 平準化生産が基礎となる。
- (3) 最終顧客への JIT を意識したシステムでない。

後工程引き取り・後補充方式では、下流工程での生産変動が大きいと上流工程の生産が混乱するため、平準化生産は、最終組立ラインにおいてもっとも厳しく守られる。とくに自動車生産においては、部品の種類と量が多いことからその傾向が強く、(3) 項にあげたように、最終顧客への JIT 供給が若干犠牲になっているようである。これは、輸出車についても平準化生産が行われ、船積みスケジュールにあわせたダンゴ生産でないことから明らかである。部品やユニットを JIT 生産し、完成品は JIT 生産しないことの経済的合理性は、自動車生産の特殊性、すなわち膨大な種類と量の部品を調達しなければならないことにあると思われる。それらの部品を JIT 供給する方が、完成品の JIT 供給より経済的合理性があるという訳である。ただし、デイリー・オーダー・エントリーシステムと組立ラインでの平準化混流生産は、消費市場に対して完成品供給を短い納入リードタイムで実現するのに非常に役立っている。

## 2.2 JIT の拡張

前節で述べたように、本来の JIT は、組立に必要な部品を、必要なときに、必要なだけ「手に入れる (前工程から引き取る)」システムとして開発された。このアイデアは、最終製品の顧客への JIT 供給を目指すとき、必要なものを、必要なときに、必要なだけ「作って供給する」システムとなる。しかし、有限な生産能力 (供給能力) のもとでは、顧客の要求する量と時期の変動が大きいと、その実現は難しくなる。そこで、顧客へ製品を JIT 供給するために、(1) 在庫量の縮減、(2) 製造リードタイムの短縮、(3) 納期ずれ最小化を考慮したスケジューリングなどが生産システムの改善や運営において考慮されることとなる。実務の側面からみると、JIT には以下の 4 つが考えられる。

- (1) 情報の JIT : 必要な計画や情報を、必要なときに、必要な精度で。
- (2) 調達の JIT : 必要な部品や資材を、必要なときに、必要なだけ。
- (3) 生産の JIT : 必要な品物を、必要なときに、必要なだけ。
- (4) 物流の JIT : 必要な品物を、必要なときに、必要な場所へ。

## 2.3 計画と管理

タイムフェイズされた各期の生産量を決定する単純な生産計画モデルを考えてみよう。目的関数は、期末の在庫費用と残業費用の和の最小化とし、記号を以下のように設定する。

### 記号

$N$  : 品目品目数

$i$  : 製品を表す添え字,  $i = 1, \dots, N$

$T$  : 計画期間

$t$  : 期を表す添え字,  $t = 1, \dots, T$

$W$  : ワークステーションの数

$w$  : ワークステーションを表す添え字,  $w = 1, \dots, W$

$X_{it}$  : 品目  $i$  の  $t$  期での生産量

$I_{it}$  : 品目  $i$  の  $t$  期末の在庫量

$O_{wt}$ : ワークステーション  $w$  での  $t$  期の残業時間

$D_{it}$ : 品目  $i$  の  $t$  期の需要量

$R_{wt}$ : ワークステーション  $w$  での  $t$  期の所定内労働時間

$S_{it}$ : 品目  $i$  の  $t$  期末の安全在庫量

$L_{wt}$ : ワークステーション  $w$  での  $t$  期の残業時間の上限

$b_{iw}$ : ワークステーション  $w$  で品目  $i$  を 1 単位処理するのにかかる時間

### 生産計画問題:

$$\min z = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T C_{Ii} I_{it} + \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T C_{ot} O_{wt} \quad (1)$$

s.t.

$$I_{i,t-1} + X_{it} - I_{it} = D_{it}, \quad i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N b_{iw} X_{it} - O_{wt} \leq R_{wt}, \quad w = 1, \dots, W; t = 1, \dots, T \quad (3)$$

$$I_{it} \geq S_{it}, \quad i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (4)$$

$$O_{wt} \leq L_{wt}, \quad w = 1, \dots, W; t = 1, \dots, T \quad (5)$$

$$X_{im}, I_{it}, O_{wt} \geq 0, \quad i = 1, \dots, N; w = 1, \dots, W; t = 1, \dots, T \quad (6)$$

この問題の実行可能性に関する議論はここではしないことにする。制約条件 (2) は、生産と需要と在庫のバランス式であり、(3) は生産能力の制約、(4) は安全在庫水準維持の制約である。ここでの決定変数は、生産量  $\{X_{it}\}$  であり、この値が決まると在庫量  $\{I_{it}\}$  と残業時間  $\{O_{it}\}$  は決まる。しかし、実際には需要予測の不正確さや納期変更、設備故障などによって各期の計画生産量を実現しても期末在庫量は計画値と違って来る。逆に計画在庫量を実現しようとすると生産量は計画量と違ってこよう。すなわち、モデルを解いて得た解を使って生産を実行するにあたって、 $\{X_{it}\}$  と  $\{I_{it}\}$  の 2 つを同時に実現することはできず、何れかを目標に生産指示・統制を行うことが必要に

なる。何れを目標にするかによって生産管理の姿が以下のように違って来ることに注意する必要があるだろう。

- (1) 各期の生産量  $\{X_{it}\}$  を目標に生産を管理する: MRP では下位レベルの生産スケジュールが上位レベルの生産スケジュールを基に作成されることから、各工程では、各期の計画生産量  $\{X_{it}\}$  を実現するように生産が管理されることになる。この場合、設備故障や需要予測の不正確さから、全工程で生産計画の修正がしばしば必要になる。
- (2) 各期末の在庫量  $\{I_{it}\}$  を目標に生産を管理する: 後工程引き取り・後補充方式はこの場合の例であり、オリジナルの JIT は在庫水準の維持を目標として生産を管理するシステムであるといえる。

## 3. JIT スケジューリングのモデル

### 3.1 後補充方式の数理計画モデル

JIT を実現するツールとして開発されたかんばんシステムは後補充方式であり、設備故障や不良品の発生、欠勤などによって起こる工程の変動を調整しながら工程での生産を少ない在庫で統制して行くシステムである。そのシステム特性については確率モデルによる解析がオーソドックスであろうが [2-5]、後補充方式を数理計画モデルとして定式化し、かんばん枚数や収容数を決定する最適化問題が考えられている。Bitran and Chang [6] は、先頭工程  $N$  から最終工程 0 に至る  $(N+1)$  工程が樹状につながった生産システムにおいて、各工程における生産指示かんばん枚数を決定する問題を以下のように整数計画問題として定式化している。

#### 主な前提条件

- (1) 各工程では 1 種類の品物を生産する。したがって、工程と品目が対応する。
- (2) 直後の後続工程は一つである。
- (3) 工程 0 の品物 (最終製品) の各期の需要は既知である。
- (4) 需要量や生産時間は確定的で、確率変動は考えない。

記号を以下のように設定する。

### 記号

$N + 1$  : 工程数 (品目数でもある)

$n$  : 工程番号 (品目) を表す添え字

$s(n)$  : 工程  $n$  の直後の工程 (番号)

$\alpha_n$  : 一つの箱の収容数

$E_{n,s(n)}$  : 工程  $s(n)$  で 1 箱分の品物を作るのに、工程  $n$  で作る品物は何箱必要かを表す箱数

$\beta_{nt}$  : 工程  $n$  の  $t$  期での生産能力 (単位はかんばん枚数)

$X_{nt}$  : 品目  $n$  の  $t$  期の空かんばん枚数で、 $t$  期に生産指示される分

$U_{nt}$  :  $t$  期末の空かんばん枚数

$U_{n0}$  : 空かんばん枚数の初期値で、意志決定の対象

$V_{nt}$  :  $t$  期に使用できる在庫に付けられたかんばん枚数

$W_{nt}$  :  $t$  期末において、かんばんが外れた箱に入っている品物の個数 (端数)

### 後補充方式の計画問題 :

$$\min z = \sum_{n=1}^N C_n [U_{n0} + V_{n0} + 1 - (1/\alpha_n)] \quad (7)$$

s.t.

$$(W_{n0}/\alpha_n) + V_{n0} + \sum_{\tau=1}^t X_{n\tau} - E_{n,s(n)} \sum_{\tau=1}^t X_{s(n),\tau} \geq 0, \quad n = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (8)$$

$$U_{n0} - \sum_{\tau=1}^t X_{n\tau} + E_{n,s(n)} \sum_{\tau=1}^{t-1} X_{s(n),\tau} - (W_{n0}/\alpha_n) + 1 - \epsilon \geq 0, \quad n = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (9)$$

$$X_{nt} \in \{0, 1, \dots, \beta_{nt}\}, \quad n = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (10)$$

$$U_{n0} \in \{0, 1, 2, \dots\}, \quad n = 1, \dots, N \quad (11)$$

ただし、

$$0 < \epsilon < \min\{1/\alpha_n | n = 1, \dots, N\} \leq 1 \quad (12)$$

目的関数は、総かんばん枚数に依存した費用である。制約条件 (8) は、後工程で必要な品物を前工程が品切れを起こさず供給することを保証する。空かんばん枚数が非負である条件は、不等式 (9) によって与えられる。このモデルでは、各工程での総かんばん枚数と空かんばん枚数の初期値、ならびにかんばんが外れた箱に入っている端数の初期値を与えると、以後のシステムのすべての状態が決まる。したがって、収容数が決まっているとき、ここでの決定変数は総かんばん枚数と空かんばん枚数の初期値である。

このモデルは、その後多くの研究者によって拡張・発展されている ([7]-[10])。Hiraki et al.[9] は、需要予測に基づいて生産指示量が決められる製品、予測量と手持ち在庫量から生産指示量が決められる部分組立品、後補充方式で輸送と生産指示がなされる部品などについての総合的な生産・在庫・輸送計画モデルを提案している。また、文献 [7] と [10] は、ロット生産を考慮にいれた後補充方式について解析している。

### 3.2 混合品種組立ラインでの投入順序決定問題

混合品種組立ラインは、基本となる製品モデルをベースとして、それにオプションを付けることで製品の多様化に対応する多品種少量生産に適合した組立ラインである。従来のライン切替方式に比べ、製品在庫と段取り替えが不要になる反面、品種によって工程間での作業時間が異なるため、工程設計ならびに品種の投入順序を決める問題が重要となる。とくに JIT 生産システムでは、組立に必要な部品を後工程引き取り方式で調達し、前工程は引き取られた分を後補充することから、製品組立ラインは、すべての前工程から引き取る部品の種類と量が平均化するように投入順序を決定しなければならない。これを投入順序計画と呼ぶ。

トヨタ自動車 (株) では、この投入順序を決定するために、目標追跡法とその発展形である目標調整法と呼ばれるヒューリスティックアルゴリズムを開発している [2: pp.419-468]。

部品の使用速度や工程間の負荷の平準化を図るための製品投入順序決定問題の基本形を大野[11]の記述に倣って以下に示す。

一定のサイクルごとにコンベヤ上に  $N$  種類の製品を投入する混合品種組立ラインを考える。ある計画期間内に生産すべき製品  $i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) の需要量  $D_i$  が与えられ、製品  $i$  を 1 個組み立てるのに前工程で生産される部品  $j$  が  $a_{ij}$  個必要なものとする ( $j = 1, \dots, J$ )。ここで、

$$K = \sum_{i=1}^N D_i \quad (13)$$

$$r_j = \sum_{i=1}^N a_{ij} D_i / K \quad (14)$$

とおき、 $k$  ( $k = 1, \dots, K$ ) 番目までに投入された製品  $i$  の累積個数を  $x_{ik}$  とおく。 $k$  番目までに投入された製品の組み立てに必要な部品  $j$  の量は、

$$\sum_{i=1}^N a_{ij} x_{ik} \quad (15)$$

であり、この値と部品  $j$  の  $k$  番目までの投入による平均的な使用量  $kr_j$  との差を最小化するように投入順序を決めなければならない。問題は、つぎのように定式化される。

平準化投入順序計画問題 :

$$\min z = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J F_j \left( \sum_{i=1}^N a_{ij} x_{ik} - kr_j \right) \quad (16)$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^N x_{ik} = k, \quad k = 1, \dots, K \quad (17)$$

$$0 \leq x_{ik} - x_{i,k-1} \leq 1,$$

$$i = 1, \dots, N; k = 1, \dots, K \quad (18)$$

$$x_{ik} \in \{0, 1, \dots, D_i\},$$

$$i = 1, \dots, N; k = 1, \dots, K \quad (19)$$

ここで、関数  $F_j$  は、0 で最小値 0 をとる単峰な凸関数である。この問題は NP 困難 [12] であり、最適解法 [13,14] とともにいくつかのヒューリスティックアルゴリズムが提案されている [14-16]。なお、ここでは、単一工程のモデルを提示したが、

文献の多くでは多段階の生産システムを意識したモデルになっている [15,17]。

各製品の必要とする部品の種類と数量が製品間で余り変化しない場合は、上記の問題は、部品レベルまで展開する必要がなく、各製品を平準化して生産すればよい。すなわち、

$$r_i = D_i / K, \quad i = 1, \dots, N \quad (20)$$

とすると、問題はつぎのように定式化される。

$$\min z = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N F_i(x_{ik} - kr_i) \quad (21)$$

s.t. (17)-(19)

ここで、関数  $F_i$  は、0 で最小値 0 をとる単峰な凸関数である。この問題は、割り当て問題に帰着され、 $O(K^3)$  時間で解けることなどが分かっている [12]。

自動車組立メーカーの製造工程は、プレス工程、ボディー溶接工程、塗装工程ならびに最終組立工程（臓装工程）からなる。上述の方法で製品の投入順序を決定しても、塗装工程における 2 度塗りや塗装の手直しによって、決定した投入順序が最終組立工程で乱される。このため、最終組立工程への投入順序が塗装工程を出たところで調整される。通常、塗装工程と最終組立工程の間にバッファが設けられており、塗装を終えた品物を最終組立工程へ投入する投入順序決定問題が提起される [18]。

混合品種組立ラインでトラックを組み立てる場合、車種ごとの工数差が大きい。このため、製品の投入順序を制御するだけでは、生産効率の改善が図れず、バイパスラインと呼ばれる補助ラインをメインラインの側に設置し、工数のかかる製品の作業を一部バイパスラインで処理する。このようなバイパスラインへの投入順序決定問題が [19,20] において議論されている。

### 3.3 納期ずれ最小化問題

JIT を納期通りに作って納めることと解釈し、あるいは、納期を守りつつ在庫を最小化する（完成から納期までの余裕を最小化する）ことと解釈した納期ずれ最小化スケジューリング問題が JIT の文脈で議論されている [21-27]。この問題は、遊

び時間の挿入を考慮しなければ最適とならないことから解くのは難しい問題である。単一機械の場合の納期ずれ最小化問題は以下のように定式化される。

$$\min \sum_{i=1}^N (\alpha_i |d_i - c_i|^+ + \beta_i |c_i - d_i|^+) \quad (22)$$

s.t.

$$c_i + p_{s(i)} \leq c_{s(i)}, \quad i = 1, \dots, N \quad (23)$$

ここで、

$N$  : スケジューリングの対象になっている  
ジョブの数

$c_i$  : ジョブ  $i$  の完了時間

$d_i$  : ジョブ  $i$  の納期

$p_i$  : ジョブ  $i$  の処理時間

$\alpha_i$  : ジョブ  $i$  が納期より早く完了したことに  
対する単位費用

$\beta_i$  : ジョブ  $i$  が納期遅れを起こしたことに  
対する単位費用

$s(i)$  : ジョブ  $i$  の直後に処理されるジョブ

$$|x|^+ : |x|^+ = \max\{0, x\}$$

Garey et al.[21] は、この問題が NP 完全であることを証明している。また、問題の特殊なケースとして以下の場合が解析されている。

- (1) 共通の納期、すなわち、すべてのジョブ  $i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) について  $d_i = d$  をもつ問題 [22]
- (2) 納期はジョブごとに異なるが、すべてのジョブについて単位費用が等しい問題 [23]
- (3) 納期はジョブごとに異なるが、単位費用が処理時間  $p_i$  に比例する問題 [24]
- (4) 納期がジョブごとに異なる場合で、遊び時間を許さない問題 [25]
- (5) ジョブ  $i$  の納期  $d_i$  を

$$d_i = p_i + q \quad (24)$$

で設定する場合、 $q$  の決定とスケジューリングを総合化した問題 [26]

これらの問題に関する詳しいレビューは [27] に与えられている。納期がジョブごとに異なり、遊び時間も考慮する場合のタブサーチアルゴリズムが [28] に提案されており、並列機械問題 [27] やフローショップ問題 [29] についても解析が進められている。

タイムフェイズされた時間軸上で納期ずれ最小化を評価基準とした生産計画・スケジューリング問題に関する研究には [30] がある。

### 3.4 相互補完生産システム

生産と物流の統合的モデル化に関する研究として Hiraki [31, 32] による相互補完生産システムの研究がある。相互補完生産システムは、多国間で部品を分担して生産し、相互に供給しあう生産システムであり、それぞれの国ごとでは市場規模は小さいが、それらをまとめることで量産効果を高めることができる。文献 [31] では、相互補完生産システムを多段階生産・在庫・輸送システムとして把握し、その計画立案のための数理モデルを混合整数計画問題として定式化し、数値例を通してモデルの特性と議論している。ここでの生産・在庫の指示方策は、3.1 節に述べた後工程引き取り・後補充方式が用いられている。

### 3.5 鉄鋼における JIT 生産・物流のスケジューリング

鉄鋼における JIT 生産・物流に関連した文献は、文献検索のシステムを使っても余り見つからない [33-35]。文献 [32] は、製鉄所での圧延装置の小型化が JIT 生産にいかにか有効であったかの報告に過ぎない。

もともと鉄鋼業は、規模の経済を追求してきた素材産業であり、過去一貫して設備の大型化によるコスト低減が図られてきた。その結果、生産システムは、JIT 生産とはほど遠い姿となり、多種多様な顧客の要求に迅速に対応できる柔軟性に欠けるものとなっている。しかし、コスト競争だけの視点では、後発生産国の韓国や中国に太刀打ちするのは難しく、製品の品質・高級化が志向されて、その技術力は非常に高いが、それら高級鋼材の出荷額は必ずしも多くない。

競争力を維持・向上させるもう一つの道は、鉄

鋼業においても JIT 生産・物流を実現して、市場の要求に柔軟に対応できる体制を確立することであろう。そのためには、制御技術による圧延装置の段取り時間短縮や製鋼装置の小型化といったハード面とともに、生産・物流における計画・スケジューリングのソフト面を JIT に合致した方法に変えることである。しかし、後者の計画技術については、原料船の運行計画 [36] や製鋼製品の輸送計画 [37] をはじめ、いくつかの報告がされているものの、明確には「鉄鋼業における JIT のコンセプト作り」が志向されているとはいえない。

#### 4. おわりに

本研究では、JIT 生産・物流のコンセプトについて私見を交えながら論述した後、JIT 生産・物流に関連したスケジューリング問題の中から 5 つのテーマを取り上げ、レビューした。主な論文を大別すると、生産指示や物流の管理に後工程引き取り・後補充方式を基礎としたスケジューリング問題、納期ずれ最小化を評価したスケジューリング問題、ならびに混合品種組立ラインへの製品投入順序決定問題に分けることができる。

生産・物流に関連して、JIT とほかのシステムとの特性比較が文献 [38,39] に議論されている。また、JIT 生産・物流の実現には、生産側の努力だけでなく、顧客側との協調が大切である [40]。

なお、本論文は、日本鉄鋼協会（計測・制御・システム工学部会）シンポジウムでの講演原稿 [41] を加筆修正したものである。

#### 文 献

- [1] 大野耐一(1978):"トヨタ生産方式", ダイアモンド社.
- [2] 門田安弘(1992):"新トヨタシステム", 講談社.
- [3] Mitra,D., and Mitrani,I.(1990): "Analysis of a kanban discipline for cell coordination in production lines: I", Management Science, Vol.36, pp.1548-1566.
- [4] Mitra,D., and Mitrani,I.(1991): "Analysis of a kanban discipline for cell coordination in production lines: II", Operations Research, Vol.39, pp.807-823.
- [5] Buzacott,J.A., Price,S.M., and Shanthikumar,J.G.(1993): "The performance of kanban controlled serial production systems", Operations Research in Production Planning and Control, Ed. by G. Fandel et al., Springer Verlag, Berlin, pp.71-88.
- [6] Bitran,G.R., and Chang,L.(1987): "A mathematical programming approach to a deterministic kanban system", Management Science, Vol.33, pp.427-441.
- [7] Philipoom,P.R., Rees,L.P., Taylor III,B.W., and Huang,P.Y.(1990): "A mathematical programming approach for determining workcentre lotsizes in a just-in-time system with signal Kanbans", Int. J. Production Research, Vol.28, pp.1-15.
- [8] Bard,J.F., and Golany,B.(1991): "Determining the number of kanbans in a multiproduct, multistage production system", Int. J. Production Research, Vol.29, pp. 881-895.
- [9] Hiraki,S., Takahashi,K., and Watanabe,N.(1994): "Designing of a componets-oriented ordering system", Int. J. Production Economics, Vol.33, pp.143-153.
- [10] Watanabe,N., and Hiraki,S.(1995): "A mathematical programming model for a pull type ordering system including lot production processes", Int. J. Operations & Production Management, Vol.15, pp.44-58.
- [11] 大野勝久(1996): "JIT 生産システムにおけるスケジューリング", 40 回システム制御情報学会研究発表講演論文集, pp.39-44.
- [12] Kubiak,W.(1993): "Minimizing variation of production rates in just-in-time systems: A survey", European J. Operational Research, Vol.66, pp.259-271.
- [13] Miltenburg,J., Steiner,G., and Yeomans,J.S.(1990): "A dynamic programming al-

- gorithm for scheduling mixed-model just-in-time production systems", *Mathematical and Computer Modelling*, Vol.13, pp. 57-66.
- [14] Bautista,J., Companys,R., and Corominas, A.(1996): "Heuristics and exact algorithms for Monden problem", *European J. Operational Research*, Vol.88, pp.101-113.
- [15] Miltenburg,J., and Sinnamon,G.(1989): "Scheduling mixed-model multi-level just-in-time production systems", *Int. J. Production Research*, Vol.27, pp.1487-1509.
- [16] Bard,E., Dar-El,E., and Shtub,A.(1992): "An analytic framework for sequencing mixed model assembly lines", *Int. J. Production Research*, Vol.30, pp.35-48.
- [17] Steiner,G., and Yeomans,J.S.(1996): "Theory and methodology: Optimal level schedules in mixed-model, multi-level JIT assembly systems with pegging", *European J. Operational Research*, Vol.95, pp.38-52.
- [18] 柳在圭,野口雅史,鳩野逸生,富山伸司,田村坦之(1998): "塗装工程を含んだJIT生産システムにおけるスケジューリング手法", *生産スケジューリング・シンポジウム'98 講演論文集*, pp.53-58.
- [19] 田村隆善,龍洪,大野勝久(1997): "バイパスラインをもつ混合品種組立ラインの順序づけ問題", *日本経営工学会誌*, Vol.48, pp.33-41.
- [20] Tamura,T., Long,H., and Ohno,K.(1998): "A sequencing problem to level part usage rates and work loads for a mixed-model assembly line with a bypass subline", *Int. J. Production Economics*, (to appear soon).
- [21] Garey,M.R., Graham,R.L., and Johnson, D.S.(1978): "Performance guarantees for scheduling algorithms", *Operations Research*, Vol.26, pp.3-21.
- [22] Szwarc,W.(1996): "The weighted common due date single machine scheduling problem revisited", *Computers Operations Research*, Vol.23, pp.255-262.
- [23] Fry,T.D., Armstrong,R.D., and Blackstone, J.H.(1987): "Minimizing weighted absolute deviation in single machine scheduling", *IIE Transactions*, Vol.19, pp. 445-450.
- [24] Yano,C.A., and Kim,Y.D.(1991): "Algorithms for a class of single-machine weighted tardiness and earliness problem", *European J. Operational Research*, Vol.52, pp.167-178.
- [25] Ow,P.S., and Morton,T.W. (1989): "The single machine early/tardy problem", *Management Science*, Vol.35, pp.177-191.
- [26] Oi,X., and Tu,F. (1998): "Theory and Methodology: Scheduling a single machine to minimize earliness penalties subject to the SLK due-date determination method", *European J. Operational Research*, Vol.105, pp.502-508.
- [27] Heady,R.B., and Zhu,Z. (1998): "Minimizing the sum of job earliness and tardiness in a multimachine system", *Int. J. Production Research*, Vol.36, pp.1619-1632.
- [28] James,R.J.W., and Buchanan,J.T. (1997): "Theory and Methodology: A neighbourhood scheme with a compressed solution space for the early/tardy scheduling problem", *European J. Operational Research*, Vol.102, pp.513-527.
- [29] Liao,C., Sun,C., and You,W. (1995): "Flow-shop scheduling with flexible processors", *Computers Operations Research*, Vol.22, pp.297-306.
- [30] Li,Y., Ip,W.H., and Wang,D.W. (1998): "Genetic algorithm approach to earliness and tardiness production scheduling and planning problem", *Int. J. Production Economics*, Vol.54, pp.65-76.
- [31] Hiraki,S. (1996): "Comparative analysis of



- ordering models for an international cooperative global complementary production system”, *Int. J. Production Economics*, Vol.44, pp.105-117.
- [32] 平木秀作 (1997): ”相互補完生産・物流情報システム的设计”, 科研費研究成果報告書 (課題番号:07680466).
- [33] Samways, N.L.(1998): ”Birmingham Steel’s 1 million ton/yr Greenfield SBQ billet mini mill at Memphis”, *Iron and Steel Engineer*, Vol.75, pp.19-23.
- [34] Ishikawa,H., Shoda,N., Arai,T., Ishii,Y., Kato,Y., Watanabe,M., and Takeuchi,H. (1997): ”Automated warehouse system for steel pipe”, *NKK Tech. Review*, No.76, pp.65-72.
- [35] Van D. Ende,J. (1995): ”Computers and industrial organization: early sources of ’just in time’ production in the Dutch Steel Industry”, *IEEE Annals of the History of Computing*, Vol.17, pp.22-32.
- [36] 松田浩一, 大方敏仁, 星野剛一, 柿坂勲男, 折方敏彦 (1998): ”原料船運航計画作成システム”, 日本鉄鋼協会 計測・制御・システム工学部会シンポジウム: 鉄鋼業における物流・流通の課題, pp.13-17.
- [37] 中川義之, 石塚美奈子, 磯貝宏, 畑野博 (1998): ”製鉄所における鉄鋼製品の輸送計画法”, 日本鉄鋼協会 計測・制御・システム工学部会シンポジウム: 鉄鋼業における物流・流通の課題, pp.30-34.
- [38] Krajewski,L.J., King,B.E., Ritzman,L.P., and Wong,D.S. (1987): ”Kanban, MRP and shaping the manufacturing environment”, *Management Science*, Vol.33, pp.39-57.
- [39] Miltenburg,J. (1997): ”Comparing JIT, MRP and TOC, and embedding TOC into MRP”, *Int. J. Production Research*, Vol.35, pp.1147-1169.
- [40] Cotton,R.D., and Shapiro,T. (1990): ”Successful customer/supplier JIT partnership: A before/after case study”, *Int. Conference Proceedings of APICS’90*, pp.172-175.
- [41] 田村隆善 (1998): ”生産と物流のジャストインタイム・スケジューリング”, 日本鉄鋼協会 計測・制御・システム工学部会シンポジウム: 大規模複雑系のモデリングと最適化, pp.15-22.

(受理 平成11年3月20日)