離散系シミュレーションを活用した 多品種多段階かんばん方式の運用手法*

光 行 恵 司^{*1}, 小 島 史 夫^{*1}, 道 場 広 貢^{*2}
福 田 好 朗^{*3}, 荒 井 栄 司^{*4}

Operation Method for Multi-Types and Multi-Stages Kanban System Using Discrete Event Simulation

Keiji MITSUYUKI^{*5}, Fumio KOJIMA, Hirotugu DOUBA,
Yoshiro FUKUDA and Eiji ARAI

^{*5} Production Engineering Department, DENSO CORPORATION,
1-1 Showa-cho, Kariya-shi, Aichi, 448-8661 Japan

Many studies have been done to optimize the Kanban system as production control system. However, most of them can be effective on only limited conditions. Therefore, these studies have difficulties to be applied in practice. The purpose of this study is to propose the practical method to operate Multi-types and Multi-stages Kanban system using discrete event simulation. The method sets the number of Kanbans much larger than the estimated number on the simulation model. From the simulation result, the surplus inventory is found. By subtracting the surplus inventory from the maximum inventory, the necessary number of Kanbans and the average of inventory are determined. Also the changeover time is calculated from the simulation result. The performance of Kanban system can be measured through the average of inventory and the changeover time. The best plan to operate Kanban system is selected among many alternatives based on that performance. To confirm the effectiveness of the method, an actual test case is tried out.

Key Words: Kanban, Simulation, Production Control, Manufacturing System

1. 緒 言

複数の多段階のラインからなる加工・組立生産システムにおいて、多品種変量生産の傾向が強まってきている。このような時代に、在庫を圧縮し、品種切り替えに即応できる生産体制を構築、運営していくことはますます重要となってきた。そのため、多段階の加工・組立生産システムでは、在庫を適正にコントロールし、品種の切り替え指示が容易な、かんばん方式に基づく生産管理が多くの企業で導入されてきている。

かんばんの運用手法については、生産量やロットサイズに基づくかんばん枚数やかんばんの指示先の設定などについて多くの研究が行われており^{①②}、シミュレーションを活用した研究も実施されている。例えば、高橋ら^③は、多段階単品種の生産システムについて、数学的モデルを使ったシミュレーションを用いて、

需要の待ち時間を一定以下に抑えながら、在庫量を最小化するためのかんばん枚数を求めるアルゴリズムを提案している。柳川ら^④は、部品使用量とリードタイムのばらつきを考慮した1段階定量引き取りかんばん方式についてシミュレーションモデルを用意し、在庫費用と引き取り費用の総和を最小化するかんばん枚数とコンテナ容量の決定方法を提案している。村木ら^⑤は、多段階の生産システムにおいて、かんばんの行き先を変化させることにより、在庫スペースを適切に調整できる階層型かんばん制御生産システムの提案をしている。

これらの研究では、単品種の扱いであったり、1段階であったり、引き取りかんばんの形式に限ったり、かんばんの行き先のみを変更させたり、ある制約の下で最適な運用条件を求めることに研究の力点を置いている。しかしながら、実際の運用においては、前提とされた制約そのものが、全て変数となる可能性があり、このようなさまざまな考慮すべき条件に応じて、制約を伴った最適化の手法を選択しながら運用条件を決定することは現実的に困難である。

* 原稿受付 2003年6月30日。

^{*1} 正員、(株)デンソー (☎ 448-8661 刈谷市昭和町1-1)。

^{*2} (株)デンソー。

^{*3} 正員、法政大学工学部 (☎ 185-8484 小金井市梶野町3-7-2)。

^{*4} 正員、大阪大学工学部 (☎ 565-0871 吹田市山田丘2-1)。

E-mail: mitsu@prd.denso.co.jp

そこで本研究では、最適化を追求するのではなく、与えられた生産条件に対して、多面的にかんばん運用条件を検討できる環境を整えることが重要であると考え、シミュレーションを活用したかんばん運用手法を提案する。

まず、かんばん方式に基づく多品種多段階生産システムの構成要素とその挙動を明確化しモデル化を行う。そのモデルに基づき、かんばん生産システムの運用条件決定上の問題点を明らかにした上で、シミュレーションを使ったかんばん生産システムの評価手法を提案する。提案した手法の有効性検証のため、多品種多段階生産システムにおけるかんばん方式の運用条件の検討を行う。

2 多品種多段階かんばん生産システムの運用条件決定上の問題

2.1 対象生産システムの前提条件 かんばん方式を用いている生産システムを物流と生産制御の観点から分析を行った。一般に加工、組立生産システムでは、単一の生産ラインのみで生産活動が行われることはまれである。本研究で対象とした生産システムは次のような前提条件を有する。

1) ワーク

多品種量産製品とする。

2) ライン

多品種のワークを同一のラインで加工・組立することができるが、品種の切り替えには品種の切り替え時間が発生する場合もある。

3) 生産システム

工程順に従ってラインが直列に多段階連なっている。ただし、ある工程は複数の並列のラインが存在する場合もある。

4) 需要

ある対象期間において、それぞれの品種毎にバラツキは有るものの平均としては一定の需要が有るものとする。

2.2 かんばんの運用モデル かんばん生産システムの運用構造は、図1に示すようにモデル化できる⁹⁾。ノードは、ワークとかんばんの状態を表し、矢印はそれぞれの状態遷移を表す。

1) 在庫

収容数分の完成品ワークとかんばんが、一体化して存在している状態をいう。

後工程の需要に従い引き取りが行われると、ワークは在庫状態から後工程へ移動し、かんばんは補充

Fig.1 Operation model of Kanban

指示の情報となり、生産計画の状態へ遷移する。

2) 生産計画

かんばんが、生産指示を行うためにかんばん単独で存在している状態をいう。

生産指示先に対してかんばんが、生産ロットサイズまでまとまると生産指示情報となり、仕掛りの状態に遷移する。

3) 仕掛り

仕掛り中ワークとかんばんが、一体化して存在している状態をいう。

必要となる部品を前工程の在庫から引き取り、ワーク完成に必要な時間を経過後、ワークは完成品となりかんばんと共に在庫補充のために在庫状態へと遷移する。

2.3 かんばん枚数決定上の問題 かんばんは、図1に示される三つの状態を遷移するかんばんサイクルをある時間を経て循環することとなる。

かんばんが、このかんばんサイクルを一周回る時間（かんばんのリードタイム）の間の需要量に対し欠品を発生させないためには、在庫量、仕掛量、生産計画数の総和が、この需要量を賄える必要がある。

すなわち、かんばんのリードタイムあたりの需要量に相当するかんばん枚数をこのかんばんサイクルの系に存在させることにより、過剰在庫も欠品もなく生産活動をコントロールすることができる。

しかし、現実には以下のようなバラツキが原因でかんばん枚数は容易には決まらない。

図2にかんばんリードタイムのバラツキを発生させる要因を示す。

1) 単一の品種でのかんばんリードタイムのバラツキ 在庫の状態から、かんばんが外れ、補充指示として生産計画の状態になるまでの受け渡すタイミングが、定時刻、一定の時間間隔で決められている場合が多

Fig.2 Factors causing the variance of the Kanban lead time

く、かんばん1枚1枚にとってみるとそのタイミングに依存した遅れ時間にバラツキがある。(図2の①)

仕掛りの状態でも生産設備の故障や不良の発生、品質確認などの非定期的な時間の発生により仕掛りの所要時間のバラツキが生じる。(図2の③)

2) 多品種でのかんばんリードタイムのバラツキ

かんばん枚数が生産ロットサイズに達し、生産指示を出す場合、その前に出された生産指示が未だ消化されていなかったり、偶然同時に複数の品種が生産ロットサイズに達したりした場合、生産指示が競合し、いずれかの品種が仕掛り待ちとなり滞留する場合がある。それは、品種数、生産ロットサイズに依存してバラツキを発生する。(図2の②)

3) 多段階生産システムのかんばんリードタイムのバラツキと引き取りのバラツキ

図3に多段階生産システムの形態例を示す。多段階生産システムでは、かんばんサイクルが連鎖でつながっていく中、後工程では別の品種だが、前工程では共通の品種となる場合もある。その結果、各かんばんサイクル間での引き取りの量、タイミングのバラツキが増幅したり、逆に減少したりと非常に予測が難しくなる。(図2の④)

また、図3の(b)のような場合、生産ライン2と生産ライン3がつながったものとして考えられるので、非定期的な時間の発生確率が増大し、仕掛り状態でのバラツキが増幅される。

2・4 生産ロットサイズの決定上の問題

一般に生産ロットサイズを大きくすると、品種切り替え頻度が減るため、需要に対して欠品を起こす可能性がある。その可能性を少なくするために、在庫量は増える傾向にある。一方、品種切り替えのロスも減少し、品種切り替えコストは低減する。

2・5 多段階連鎖の形態決定上の問題 一般に生産リードタイムを長くすると、需要に対して生産して供給する応答性が悪くなり、供給の遅れによる欠品発生防止のため在庫量は増える。

多段階生産システムの中で、かんばんサイクルの連鎖のさせ方で生産リードタイムが変化する。例えば、図3の(a)と(b)は同じ生産ラインの構成であるが、(a)は1本ずつを別のラインとして見て生産指示を出す、(b)は2本を一連のラインとしてみなして生産指示を出しており、生産制御という視点からは生産のリードタイムが異なってくる。

Fig.3 Structure of multi stages Kanban-production

2・6 システムの評価 多品種多段階かんばん生産システムの運用を評価する基準は、在庫コストと品種切り替えコストの総和で行われる。

これらの関係は、トレードオフの関係になる。

1) 在庫コスト

在庫置き場にワークが滞留すること、あるいは欠品することに伴い発生するコストをいう。滞留側では在庫品の金利、管理費用、置き場の面積費用など、欠品側では、機会損失、賠償などがあげられる。

2) 品種切り替えコスト

生産ラインで品種切り替えに伴い発生するコストをいう。品種切り替え時の設備停止時間や作業者の休止および作業時間による損失などがあげられる。

3 シミュレーションを用いたかんばん生産システムの運用手法

かんばん生産システムの運用を適切に行うためには、2・3で整理したバラツキを考慮して、運用条件であるかんばん枚数、生産ロットサイズ、多段階連鎖の形態を在庫コストと品種切り替えコストの総和

が最も小さくなるよう決定しなければならない。しかし、実際の生産現場では、全てのパラツキを数理的に求め、かんばんリードタイムを推定し運用条件を決定していくことは実行上極めて困難である。

そこで、本研究では 2・3 で上げたパラツキについて離散系シミュレーション技術を活用して再現し、適切な運用条件を実験的に求めるかんばん方式の運用手法を提案する。

3・1 運用手法

運用手法のステップを図4に示す。

Step1で対象とする生産システムのシミュレーションモデルを作成し、多段階連鎖の形態を設定し、Step2で生産ロットサイズ、Step3でかんばん枚数は過剰に与えてシミュレーションを実行する。

Step4のシミュレーション実行結果から、品種毎の在庫推移を求め、Step5で最小在庫量までの常に滞留している余剰在庫量を確認する。Step6で余剰在庫に相当するかんばん枚数だけを余剰かんばんとして初期に設定したかんばん枚数から差し引き、必要かんばん枚数を求める。

Step7で在庫量から余剰在庫量を差し引く。Step8で、在庫が必要かんばん枚数で運用された条件における在庫量となり、そこから平均在庫量を求め、同時に、品種切り替え時間をシミュレーション実行結果から求める。Step9で在庫費用と品種切り替え費用の評価を行う。

Step10で候補案比較を行い、かんばん枚数、生産ロットサイズ、多段階連鎖の形態の運用条件を決める。

3・2 提案手法の適用例

提案した手法の適用検討例を以下に示す。シミュレーションには、多段階連鎖のかんばんの流動のモデルをパラメータによって設定できるシミュレータ⁶⁾を用いている。本シミュレータは、GPSSによって開発されている。

3・2・1 対象生産システム

図5、表1に対象となる生産システムを示す。

在庫2からの引き取りは時間当たり6回で、1回あたりの引き取り量は、平均値の4分の1の標準偏差で、正規分布に従いばつくものとした。

Step1: 生産システムのモデル化

表1の生産システムの条件と図5に示すラインの前後関係を明確にしてシミュレーションモデルを作成する。本計算例では、図6のように開発したシミュレータでパラメータを指定してモデルを構成した。

Fig.4 Method to design and improve Kanban system

Fig.5 Sample of Production System

Fig.6 Sample of parameters of simulator

Table1 Condition of Production System

	Line1				Line2				
Cycle Time(s)	10				10				
Lead Time(s)	600				200				
Changeover Time(s)	100				10				
Product Type	11	12	13	01	02	03	04	05	
Kanban Capacity(pieces/Kanban)	10	10	10	2	2	2	2	2	2
Part for	01,02	03,04	05	-					
Withdrawing Volume(pieces/h)	90	180	60	60	30	150	30	60	60

Step2: ロットサイズの設定

品種01から05まではロットサイズを10個（かんばん5枚）に、品種11, 12は100個（かんばん10枚）、13は200個（かんばん20枚）に設定する。

Step3: 過剰なかんばん枚数の設定

品種 01 から 13 まで、全ての品種について 100 枚のかんばん枚数を与え、それを初期在庫として在庫 1、在庫 2 に設定する。

Step4: シミュレーションの実行

シミュレーション時間として 20 時間分を実行。実行結果として得られる在庫の推移を品種 12 の例で図 7 に示す。初期在庫のかんばん 100 枚分からは、時間とともに減少し、最初の 6000 秒あたりまでは過渡状態で一方的に減少している。その後、定常状態になり、ある範囲内で在庫量が推移している。

Step5: 過剰在庫の計算

図 7 の例では、かんばん 71 枚分の在庫が常に滞留しており、この分が過剰であると判断できる。

Fig.7 Simulation result of inventory of type 12

Step6: 必要かんばん枚数の決定

(初期かんばん枚数－過剰在庫分のかんばん枚数)で計算し、図 7 の例では、29 枚である。

Step7: 在庫量のオフセット処理

過剰在庫であるかんばん 71 枚分をオフセットする。オフセットした結果を図 8 に示す。

Fig.8 Offset result of inventory of type 12

Step8: 平均在庫量と品種切り替え時間の計算

オフセットされた結果から、定常状態後の平均在庫量が求まる。品種 12 の例では、8.9 枚分である。

同様に品種 01 は 5.7 枚、品種 02 は 5.4 枚、品種 03 は 15.7 枚、品種 04 は 6.1 枚、品種 05 は 7.9 枚、品種 11 は 5.9 枚、品種 13 は 6.3 枚と求まる。

またライン 1、ライン 2 の品種切り替え時間を求める。今回の例では、定常状態になった後の総品種切り替え時間は、それぞれ 4300 秒、4010 秒となり、1 時間当たり 235 秒、219 秒になる。

Step9: 在庫と品種切り替えの全体コストの計算

平均在庫量と品種番切り替え時間を所定のコスト換算ルールに従い計算し、全体コストを求める。

Step10: 他の代替案との比較

Step1 から Step10 までの手順を繰り返す。最善のかんばん運用条件を決定する。

4 適用実験

開発した手法を用いて実際の冷鍛部品工場のかんばん方式運用条件の検討を行った。事例を図 9 に示す。

Fig.9 Cold forging shop floor for test case

18 種の品種を流動する工場で、2 本の切断ライン、1 本のアニーリングライン、6 本の冷鍛プレスラインから構成される。切断ラインでは、品種切り替え時間が 10 分～30 分、冷鍛プレスラインでは 60 分～300 分かかる。本ラインは、多品種多段階かんばん生産システムの要素を含んだ典型的な一例である。

この工場を対象に、4 ケースのかんばんの運用を検討した。ケース 1 は、冷鍛プレスラインのそれぞれの在庫から完成品が引き取られると、冷鍛プレスラインの先頭に生産指示が送られ、かんばん枚数が所定のロットサイズになると仕掛けられる。仕掛けに当たっては、必要なアニーリングライン完成品を引き取り使用する。アニーリングラインでは、完成品が引き取られると、その数に従って 2 本の切断ライン先頭に生産

指示が割り振られて送られる。所定のロットサイズになると切断ラインに仕掛けられる。

ケース2は、かんばんの流れを冷鍛プレスラインの完成品が引き取られると直接切断ラインの先頭に行き、大きな一つのかんばんサイクルとして運用する。ケース3は、ケース2と同じかんばんサイクルを用い、仕掛けロットサイズを70%にする。ケース4は、仕掛けロットサイズを50%にしている。

これらについて、提案する運用手法を適用した結果を図10から図12に示す。なお、ここでは、比較のために正規化してグラフに示している。Step6で、まず対象工場をかんばん方式で欠品無く運用するのに最小限必要なかんばん枚数を求めた。ケース1：720枚、ケース2：577枚、ケース3：410枚、ケース4：377枚となった。

Step8で求めた平均在庫量を4つの代替案で比較したものを図10に、品種切り替え時間を比較したものを図11に示す。対象工場では、図10に示すように、かんばんの流れを大きなサイクルに変えたケース2では在庫が減り、ロットサイズを小さくしたケース3、ケース4ではさらに在庫が減っている。一方、図11に示すようにケース1よりケース2では段取り時間が減っているが、ロットサイズを小さくしたケース3、ケース4では、段取り時間が増えている。

Step9で、以上の結果をコスト換算し、Step10で4つの代替案の在庫コストと品種切り替えコストの総和を比較した結果を図12に示す。この例においては、在庫量も段取り時間も少ないケース2が最小であり、最も有効なかんばんの運用条件であると判断できる。

ケース2の結果に基づき、実際の対象工場を最小のかんばん枚数で実行して、生産に問題が生じないことを確認し、この手法の有効性を確認した。

5 結 言

多品種多段階かんばん方式の設計および改善活動を行っていく上で、自らの考えた運用条件の良し悪しを効率的に判断することを支援するシミュレーションを活用したかんばん運用手法を提案した。

本手法では、運用条件として、あらかじめ過剰なかんばん枚数を与えてシミュレーションを実行し、結果の余剰在庫から、欠品無く運用するのに最小限必要なかんばん枚数を求める方法を取ることで、かんばん方式で運用される生産システム内の在庫量を容易に求めることができる。そして、その在庫量と品種切り替

えの時間から運用条件に依存する総コストを導き運用条件決定の意思判断が行える。

Fig.10 Inventory

Fig.11 Changeover Time

Fig.12 Comparison among four cases

参考文献

- (1) Hung C.C. and Kusiak A., Overview of Kanban systems, Int. J. Computer Integrated Manufacturing, 9-3, (1996), 169-189
- (2) Akturk M.S., and Erhun F., An overview of design and operational issues of kanban systems, Int. J. PROD RES, 37-17, (1999), 3859-3881
- (3) 高橋勝彦・中村信人, 日本経営工学会誌, No.47-6 (1997), 403-411
- (4) 柳川佳也・他2名, 日本経営工学会誌, No.43-1 (1992), 1-5
- (5) 村木孝彰・平川保博, 日本経営工学会誌, No.49-1 (1996), 31-35
- (6) Mitsuyuki, K., 35th CIRP-ISM (2002), 59-65
- (7) 門田安弘, トヨタ生産方式の新展開, (1983), 日本能率協会