多品種少量生産におけるエネルギー原単位の定式化

Formulation of Energy Consumption per Production Throughput under High-mix Low-volume Production

山本将大*・日比野浩典*・堀川貴正*・山口 誠**

Masahiro YAMAMOTO, Hironori HIBINO, Takamasa HORIKAWA and Makoto YAMAGUCHI

(Received March 1, 2018)

Recently, getting more reduction of energy consumption is attracting the attention not only of society, but also of industries. The other hand, the industries need to apply high-mix low-volume productions in response to customer needs. Therefore, the industries have to simultaneously realize productivity applying high-mix low-volume productions, and reduction of energy consumption. Previous studies conducted on the formulation of energy consumption per production throughput. However, research on the formulation of considering production for the high-mix low-volume production line has not been conducted.

In this study, we propose a formulation of relationship between production conditions and energy consumption per production throughput for high-mix low-volume productions. We consider lot size, cycle time, and setting-up time as production conditions. Case studies for the printed circuit board production are carried out to verify our proposed formulation.

Key Words: Manufacturing System Simulation, Energy Consumption, Production Condition, High Mix Low Volume Production

1. 緒言

エネルギーの効率的な利用は、あらゆる分野において必須の課題となりつつある。産業界において、2014年4月に施行されたエネルギーの使用の合理化等に関する法律（省エネ法）の改正により、年間1500kl以上のエネルギーを使用する事業者を対象に、エネルギー消費原単位を年平均1%以上低減することが制度化¹⁾され、生産活動における消費エネルギー量の事前評価、および、消費電力を考慮した工場管理、生産計画が必要となっている²⁾。また、2015年12月のCOP21において締結されたパリ協定により、すべての国に温室効果ガスの削減目標の提出、および、目標達成のための対策を措置することが義務化された³⁾。その結果、国内における対応策の1つとして、産業界における省エネルギー化を実現するために、製造プロセスにおけるエネルギーの使用状況を解析し、エネルギーを効率的に利用するためのエネルギーマネジメント技術の革新を実現することが挙げられている⁴⁾。従来、生産性の事前評価に関して、生産システムシミュレーションを利用する事前評価手法が進展していた⁵⁻¹²⁾。しかしながら、世界的な背景により、今後の産業界においては、生産性に加え消費エネルギー量を考慮する事前評価手法や新しい生産計画・マネジメントの確立が必要となる¹³⁻¹⁵⁾。生産性と消費エネルギー量を考慮する事前評価手法については、生産性と消費エネルギー量によ

って算出されるエネルギー原単位を用いて、生産システム設計時に生産性と消費エネルギー量を同時算出する手法の提案¹⁶⁾¹⁷⁾が行われている。また、生産性と消費エネルギー量を考慮する生産計画・マネジメント手法については、生産ラインにおけるエネルギー原単位とロットサイズの関係に着目し、エネルギー原単位のロットサイズ依存性に関する定式化を行い、理論の妥当性が確認されている¹⁸⁻²⁰⁾。

他方で、近年消費者ニーズが多様化し、かつ、製品のライフサイクルが短期化している。これらにより、企業は単品種生産ラインから、ニーズや技術の変化に即した多品種少量生産ラインへの移行を進めており、近年では生産における優位性として多品種少量生産を挙げる企業が多くなっている²¹⁾。したがって、多品種少量生産ラインにおける生産性と消費エネルギー量を考慮する生産計画・マネジメント手法が必要となっているが、これまでの研究において、実施されていない。

そこで、本研究では、生産性と消費エネルギー量を考慮する生産計画・マネジメント手法として、多品種少量生産ラインにおける生産条件とエネルギー原単位の関係性について理論的な定式化を行う。その際、生産条件として、生産計画における重要な指標であるロットサイズ、各設備のサイクルタイム、および各設備の段取時間を考慮する。また、プリント基板製造ラインを対象にケーススタディを実施し、提案する理論の妥当性について検証を行う。

* 東京理科大学大学院 理工学部 経営工学科専攻 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

Graduate School of Science and Technology, Tokyo University of Science (2641 Yamazaki, Noda-shi, Chiba 278-8510, Japan)

** 秋田大学大学院 理工学研究科 システムデザイン工学専攻 機械工学コース (〒010-8502 秋田市手形学園町1番1号)

Graduate School of Engineering Science, Faculty of Engineering Science, Department of System Design Engineering, Mechanical Engineering Course, Akita University (1-1 Tegatagakuenmachi, Akita-shi, Akita 010-8502, Japan)

2. 多品種少量生産ラインにおける課題の整理

本章では、多品種少量生産ラインにおいて考慮すべき生産条件を整理し、課題を述べる。

多品種少量生産ラインにおいては、需要の変動による欠品に対応するため一定の製品在庫を保有するものの、できる限り小さい在庫量での運用が求められている。製造ロットサイズが大きい場合、対象ロットの製品の製造のため、生産ラインを長時間同一の製品製造のために割り当てることになる。その間、他の品種の製造ができず、他の品種は欠品する。また、製造ロットサイズが大きいと、直近の需要量よりも多くの製品を製造するため、製品在庫量が増える。そのため、品種ごとの需要量の比率を取り、その比率を利用してロットサイズを決定し、製造することで、欠品や在庫量を少なくする平準化生産を実施することが多い。平準化生産におけるロットサイズの決定については、中長期の需要量予測から比率を決め、日単位、時間単位、分単位などの時間分割単位でロットサイズを決定する(Fig.1)。一般的には、時間分割単位は可能な限り小さくすることが多い。これらより、多品種少量生産における生産条件として、平準化生産を前提とした品種ごとに異なるロットサイズを考慮する必要がある。

次に、平準化生産において、各設備における作業内容は品種により異なるため、各設備におけるサイクルタイムは、品種により異なる(Fig.2)。サイクルタイムが品種ごとに異なる場合、設備間に生産能力の差が生じ、スタービングやブロッキングなどの現象が生産ラインで発生するため、ものの流れに影響を与える。

また、平準化生産による生産ラインの各設備は、品種切り替えの段取替えが頻繁に発生し、生産性の低下が起り易い。その際、品種切替の段取時間は、品種によって異なることが多い(Fig.2)。

これらより、多品種少量生産ラインにおける生産条件として、生産ラインの各設備では、段取時間、サイクルタイムを考慮する必要がある。また、これ

Fig.1 Lotsize in high-mix low-volume production line.

ら3つの生産条件は生産性に影響する。エネルギー原単位は生産量とエネルギー消費量から算出するため、3つの生産条件はエネルギー原単位に影響する。しかしながら、多品種少量生産ラインにおけるこれらの生産条件とエネルギー原単位の関係性は定量的に評価されていない。

3. 多品種少量生産ラインにおける定式化

定式化のための前提条件

以下に本研究の定式化のための前提条件を定義する。

- 設備は直列に結ばれている。
- 複数の品種を同一生産ラインで製造する。
- すべての設備は、総稼働時間 T の間に、加工状態 T_r^k 、段取状態 T_s^k 、待機状態 T_i^k いずれかの状態に属するものとする。(Fig.3)
(設備1, 設備2, ..., 設備 k , ..., 設備 n)
- ロットサイズ、各設備のサイクルタイム、および段取時間が品種ごとに異なる。
- 稼働時間が十分に長い。
- 各設備間にはバッファ (バッファサイズ無限大) が存在する。
- 故障はしない。
- 各設備状態の単位時間における消費エネルギーは一定である。

3.1.1 エネルギー原単位

製造に用いる消費エネルギーに対する生産量を評価する代表的な指標として、エネルギー原単位の利用が進展している。エネルギー原単位 U は、総生産量 P 、および、総消費エネルギー量 E により算出される。

$$U = \frac{E}{P} \quad (1)$$

U : エネルギー原単位
 P : 総生産量
 E : 総消費エネルギー量

Fig.2 Cycle time and Setting-up time in high-mix low-volume production line.

消費エネルギーを電力とすると、エネルギー原単位 U の単位は kWs/個 となる。消費エネルギーおよび生産個数の単位時間あたりの量を、消費電力 e （単位時間あたりの消費エネルギー）、および、スループット p （単位時間あたりの生産個数）と呼ぶこととする。単位時間として秒を用いると、消費電力の単位は kW 、スループットの単位は 個/s となる。

3.2 多品種少量生産ラインにおける生産条件

3.2.1 ロットサイズ

多品種少量生産ラインにおいて、品種ごとに異なるロットサイズを考慮する必要がある。本研究におけるロットサイズを次のように定義する。

品種ごとのロットサイズは、生産量の比を用いて決定される。そのため、多品種における品種ごとの生産量 $\{P^1, P^2, \dots, P^x, \dots, P^n\}$ の整数比を品種ごとのロットサイズ $\{LS(1), LS(2), \dots, LS(x), \dots, LS(n)\}$ とする（ P^x ：品種 x の生産量、 $LS(x)$ ：品種 x のロットサイズ）。一度決定したロットサイズは変更しないものとする。すべての品種を 1 ロット生産するまで品種の重複はないものとし、投入順序は問わないが、一度決定した投入順序を繰り返すものとする。

したがって、多品種における品種 x の生産割合 P^x/P は、品種 x のロットサイズ $LS(x)$ をすべての品種におけるロットサイズの総和で除することで求められる。

$$\frac{P^x}{P} = \frac{LS(x)}{\sum_{i=1}^n LS(i)} \quad (2)$$

P^x : 品種 x の生産量
 $LS(x)$: 品種 x のロットサイズ

3.2.2 各設備のサイクルタイム

多品種少量生産ラインにおいて、品種ごとに異なる各設備のサイクルタイムを考慮する必要がある。

Fig.3 Relationship between total operating time and total operating time of each state in k-th facility.

本研究における各設備のサイクルタイムを次のように定義する。

品種 x における設備 k のサイクルタイムを $1/p_r^{k,x}$ （設備 k における品種 x のスループット $p_r^{k,x}$ の逆数）とあらわす。

3.2.3 各設備の段取時間

多品種少量生産ラインにおいて、品種ごとに異なる各設備の段取時間を考慮する必要がある。本研究における各設備の段取時間を次のように定義する。

品種 x における設備 k の段取時間を $\lambda^{k,x}$ とあらわす。また、品種 x における設備 k の段取時間 $\lambda^{k,x}$ は他の品種から品種 x に段取替えを行う際、もしくは、品種 x から他の品種に段取替えを行う際の時間であり、本研究では他の品種には依存しないものとする。

3.3 仕掛係数

設備間にはバッファがあり、設備間の生産能力の差により滞りが発生する場合には、稼働終了時にバッファにワークが存在することになる。ここで、設備 k における総生産量 P^k を総生産量 P で除した値を設備 k における仕掛係数として以下のように定義する。

$$q^k = \frac{P^k}{P} \quad (3)$$

q^k : 設備 k の仕掛係数
 P^k : 設備 k の生産量

すなわち、仕掛係数を用いることで、各設備の生産量 P^k を、総生産量 P を用いて表すことができる。各設備の生産量と総生産量が同じであれば $q^k = 1$ 、各設備の生産量が、総生産量よりも大きい場合は、 $q^k > 1$ となる。また、 q^k は前行程にいくほど大きくなり、

$$q^1 \geq \dots \geq q^{k-1} \geq q^k \geq q^{k+1} \geq \dots \geq q^n = 1 \quad (4)$$

の関係がある (Fig.4)。設備 k と設備 $k+1$ の間にあるバッファのサイズ N_{buf}^k が有限である場合には、設備 k の生産個数 P^k は、最大でも $P^{k+1} + N_{buf}^k$ である。さらに、 n 個の設備がある場合には、以下のようになり、総稼働時間を長くし、総生産量が大きくなれば、仕掛係数は 1 となる。

Fig.4 Works-in-process coefficient.

$$\begin{aligned}
 q^k &= \frac{P^k}{P} \leq \frac{P^{k+1} + N_{buf}^k}{P} \\
 &\leq \frac{P^{k+2} + N_{buf}^k + N_{buf}^{k+1}}{P} \\
 &\leq \dots \leq \frac{P^n + N_{buf}^k + N_{buf}^{k+1} + \dots + N_{buf}^{n-1}}{P} \\
 &= 1 + \frac{N_{buf}^k + N_{buf}^{k+1} + \dots + N_{buf}^{n-1}}{P} \\
 N_{buf}^k &: \text{設備}k \text{と設備}k+1 \text{の間にある} \\
 &\quad \text{バッファのサイズ}
 \end{aligned} \tag{5}$$

また、バッファのサイズ N_{buf}^k が無限である場合には、式 (5) より仕掛係数は 1 以上となる。

3.4 設備 k の各状態 m に関する時間 T_m^k

3.4.1 設備 k の総加工時間 T_r^k

多品種少量生産ラインにおいて、設備 k の総加工時間 T_r^k は設備 k における品種ごとの加工時間の総和であることから設備 k における品種 x の加工時間 $T_r^{k,x}$ を用いると以下ようになる。

$$\begin{aligned}
 T_r^k &= \sum_{x=1}^n T_r^{k,x} \\
 T_r^k &: \text{設備}k \text{の総加工時間} \\
 T_r^{k,x} &: \text{設備}k \text{における品種}x \text{の加工時間}
 \end{aligned} \tag{6}$$

設備 k における品種 x の加工時間 $T_r^{k,x}$ は、設備 k における品種 x の生産量 $P^{k,x}$ と設備 k における品種 x のサイクルタイム $1/p_r^{k,x}$ の積で求められることから、以下ようになる。

$$\begin{aligned}
 T_r^{k,x} &= \frac{P^{k,x}}{p_r^{k,x}} = \frac{P^k P^x}{P} \frac{P}{p_r^{k,x}} = q^k \frac{LS(x)}{\sum LS(i)} \frac{P}{p_r^{k,x}} \\
 P^{k,x} &: \text{設備}k \text{における品種}x \text{の生産量} \\
 p_r^{k,x} &: \text{設備}k \text{における品種}x \text{の} \\
 &\quad \text{スループット}
 \end{aligned} \tag{7}$$

したがって、設備 k における総加工時間は以下のようにあらわされる。

$$T_r^k = q^k P \sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} \frac{1}{p_r^{k,x}} \right) \tag{8}$$

3.4.2 設備 k の総段取時間 T_s^k

設備 k の総段取時間 T_s^k も同様にして、品種ごとの段取時間の総和であることから、設備 k における品種 x の段取時間 $T_s^{k,x}$ を用いると、以下ようになる。

$$T_s^k = \sum_{x=1}^n T_s^{k,x} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
 T_s^k &: \text{設備}k \text{の総段取時間} \\
 T_s^{k,x} &: \text{設備}k \text{における品種}x \text{の段取時間}
 \end{aligned}$$

設備 k における品種 x の段取時間 $T_s^{k,x}$ は、設備 k における品種 x の段取回数と設備 k における品種 x の 1 回の段取に要する時間 $\lambda^{k,x}$ の積である。設備 k における品種 x の段取回数は設備 k における品種 x の生産量 $P^{k,x}$ を $LS(x)$ で除することにより求められるため、設備 k における品種 x の段取時間 $T_s^{k,x}$ は、以下ようになる。

$$\begin{aligned}
 T_s^{k,x} &= \frac{P^{k,x} \lambda^{k,x}}{LS(x)} = \frac{P^k P^x}{P} \frac{\lambda^{k,x}}{LS(x)} = \frac{q^k P \lambda^{k,x}}{\sum LS(i)} \\
 \lambda^{k,x} &: \text{設備}k \text{における品種}x \text{の1回の} \\
 &\quad \text{段取に要する時間}
 \end{aligned} \tag{10}$$

したがって、設備 k における総段取時間は以下のようにあらわされる。

$$T_s^k = q^k P \sum_{x=1}^n \left(\frac{\lambda^{k,x}}{\sum LS(i)} \right) \tag{11}$$

3.4.3 設備 k の総待機時間 T_i^k

設備 k の総待機時間 T_i^k は総稼働時間 T から、総加工時間 T_r^k 、総段取時間 T_s^k を除いた値であり、以下のようにあらわされる。

$$\begin{aligned}
 T_i^k &= T - T_r^k - T_s^k \\
 T_i^k &: \text{設備}k \text{の総待機時間} \\
 T &: \text{総稼働時間}
 \end{aligned} \tag{12}$$

3.5 設備 k の消費エネルギー

設備 k の加工状態における、消費電力を e_r^k 、段取状態における消費電力を e_s^k 、待機状態における消費電力を e_i^k とすると、設備 k の消費エネルギー E^k は、以下のようにあらわされる。

$$\begin{aligned}
 E^k &= e_r^k T_r^k + e_s^k T_s^k + e_i^k T_i^k \\
 E^k &: \text{設備}k \text{の消費エネルギー} \\
 e_r^k &: \text{設備}k \text{の加工状態における} \\
 &\quad \text{消費電力} \\
 e_s^k &: \text{段取状態における消費電力} \\
 e_i^k &: \text{待機状態における消費電力}
 \end{aligned} \tag{13}$$

3.6 設備 k のエネルギー原単位

設備 k のエネルギー原単位 U^k を以下のように定義する。

$$U^k = \frac{E^k}{P} \tag{14}$$

ここで、生産ライン全体のスループット p は、総生産量 P を総稼働時間 T で除することにより求められるため、以下のようにあらわされる。

$$p = \frac{P}{T} \quad (15)$$

したがって、 U^k は式 (8)、(11)、(12)、(14) および (15) より以下のようにあらわされる。

$$\begin{aligned} U^k &= \frac{1}{p} (e_r^k T_r^k + e_s^k T_s^k + e_i^k T_i^k) \\ &= q^k \left(e_r^k \sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} \frac{1}{p_r^{k,x}} \right) \right. \\ &\quad \left. + e_s^k \sum_{x=1}^n \left(\frac{\lambda^{k,x}}{\sum LS(i)} \right) \right) \\ &\quad + e_i^k \left(\frac{1}{p} - q^k \sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} \frac{1}{p_r^{k,x}} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{\lambda^{k,x}}{\sum LS(i)} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

p : 生産ライン全体のスループット

式 (16) より、多品種少量生産ラインにおける設備 k のエネルギー原単位 U^k を生産ラインの基本情報である品種ごとのロットサイズ $LS(x)$ 、品種ごとの各設備のサイクルタイム $1/p_r^{k,x}$ 、段取時間 $\lambda^{k,x}$ 、消費電力 e^k 、および、未知の変数である仕掛係数 q^k 、スループット p を用いてあらわすことができた。

3.7 仕掛係数 q^k とスループット p の算出方法

まず、設備 k のスループット p^k は、設備 k の総生産量 P^k を総稼働時間 T で除することで求められるため、以下のようになる。

$$p^k = \frac{P^k}{T} \quad (17)$$

p^k : 設備 k のスループット

次に、仕掛係数 q^k は、設備 k のスループット p^k 、および、生産ライン全体のスループット p を用いると、式 (3) より以下のように書き換えられる。

$$q^k = \frac{P^k}{P} = \frac{P^k/T}{P/T} = \frac{p^k}{p} \quad (18)$$

式 (18) は仕掛係数 q^k とスループット p の関係性をあらわしている。式 (18) より、 q^k または p のどちらか一方の変数のみ求められる場合においても、 p^k を求めることができれば、もう一方の変数を求められることがわかる。

また、式 (16) であらわされる項を次のように p_0^k と定義する。

$$p_0^k = \left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} \frac{1}{p_r^{k,x}} + \frac{\lambda^{k,x}}{\sum LS(i)} \right) \right)^{-1} \quad (19)$$

p_0^k : 設備 k が単独で稼働した際のスループット

ここで、設備 k のスループット p^k は、設備 k より前設備にある設備 k' ($k' < k$) が設備 k より性能の悪い（設備が単独で稼働した場合のスループット p_0^k が小さい、すなわち、 $p_0^{k'} < p_0^k$ ）場合、設備 k は、供給されるワークがなく、加工が停止する状態（スタービング）が発生し、スループット p^k は p_0^k ではなく $p_0^{k'}$ となる。また、設備 k' ($k' < k$) が設備 k より性能が良い（ $p_0^{k'} > p_0^k$ ）場合、スループット p^k は p_0^k となる。したがって、設備 k とその前設備 $k-1$ の間には、式 (20)、(21) の関係が成り立つ。

$$p_0^k > p^{k-1} \rightarrow p^k = p^{k-1} \quad (20)$$

$$p_0^k < p^{k-1} \rightarrow p^k = p_0^k \quad (21)$$

さらに、設備 1 ($k = 1$) では部品は絶え間なく供給されると仮定すると、

$$p^1 = p_0^1 \quad (22)$$

となる。したがって、式 (20) ～ (22) より、すべての p^k を決定することができる。すなわち、 p^k は、設備 k より前設備にある最も性能の悪い設備で律速されるため、以下のようにあらわせる。

$$p^k = \min\{p_0^1, p_0^2, \dots, p_0^k\} \quad (23)$$

同様に、 p は、生産ライン全体で最も性能の悪い設備に律速されるため、以下のようにあらわせる。

$$p = \min\{p_0^1, p_0^2, \dots, p_0^k, \dots, p_0^n\} \quad (24)$$

式 (24) より、スループット p は、各設備におけるサイクルタイム等の生産条件を用いて求めることができる。同様に、仕掛係数 q^k に関しても、式 (18) より以下のように求めることができる。

$$q^k = \frac{p^k}{p} = \frac{\min\{p_0^1, p_0^2, \dots, p_0^k\}}{\min\{p_0^1, p_0^2, \dots, p_0^k, \dots, p_0^n\}} \quad (25)$$

以上より、式(16)において、未知の変数であったスループット p 、仕掛係数 q^k を式 (24)、(25) より求めることが可能となる。したがって、多品種少量生産ラインにおけるエネルギー原単位を生産ラインの基本情報を用いて定式化することができた。

4. 多品種少量生産ラインにおける定式の検証

本章では、3つの生産条件とエネルギー原単位の関係性について、3章で提案した定式（式（16））の妥当性の検証を行う。3つの生産条件とは、多品種少量生産ラインにおけるロットサイズ、各設備のサイクルタイム、および段取時間である。

4.1 前提条件

今回の検証では、プリント基板製造ラインを対象として、シミュレーションを行い、得られた仮想的実データを用いて妥当性を検証する。シミュレーションは、先行研究において、生産性と消費エネルギー量を同時に事前評価するシミュレーションシステムを参考に、生産システムシミュレーションソフトである WITNESS²²⁾を用いて構築した。生産システムシミュレーションは、生産システムをコンピュータ上の仮想モデルとして模擬的に表現し、ワークなどのものの流れ方などを、離散的に時刻を進めながら擬似実現する。すなわち、実際の生産システムにおいて、ものが必要とする処理時間を、経過を追いながら模擬的に実験できるものである。今回の検証では、対象生産ラインの一部であるはんだ印刷設備、マウンター設備、はんだリフロー設備をモデル化する。はんだ印刷設備を $k=1$ 、マウンター設備を $k=2$ 、および、はんだリフロー設備を $k=3$ とし、各設備の前にそれぞれバッファが存在、生産する品種は3種類（Product 1, Product 2, Product 3）とする。はんだ印刷設備、マウンター設備、および、はんだリフロー設備のシミュレーションモデルは、加工状態、段取状態、待機状態の3つの状態のいずれかに属するものとする。Fig.5に検証を行う生産ラインのモデルを示す。消費エネルギーとして、消費電力を評価する。Table 1に各設備の単位時間における状態ごとの消費電力を示す。

ケーススタディのシナリオに関しては、今回考慮した3つの生産条件とエネルギー原単位の関係性を検証するため、以下の3つのシナリオを実施した。

Fig.5 Model of semiconductor manufacturing line.

Table 1 Energy consumption per unit time for each state.

variable		facility		
		Printer $k=1$	Mounter $k=2$	Reflow $k=3$
e_p^k	[kW]	1.25	3.75	3.00
e_s^k	[kW]	3.00	1.50	-
e_t^k	[kW]	0.20	0.20	3.00

- シナリオ1：ロットサイズとエネルギー原単位の関係性
- シナリオ2：マウンター設備のサイクルタイムとエネルギー原単位の関係性
- シナリオ3：マウンター設備の段取時間とエネルギー原単位の関係性

シナリオ 1、2、3 における生産条件をそれぞれ Table 2、Table 3、および Table 4 に示す。シミュレーションにおいて、確率的な変動を考慮するために、各設備、各品種のスループット $p_r^{k,x}$ 、段取時間 $\lambda^{k,x}$ に関しては、正規分布に従う乱数を用いた。シナリオ1において変動させるロットサイズ、シナリオ2において変動させるマウンター設備のサイクルタイム、シナリオ3において変動させるマウンター設備の段取時間、それぞれ6通りを Table 5 に示す。

Table 2 Production conditions in scenario 1.

Product No.	variable	Lotsize	facility		
			Printer $k=1$	Mounter $k=2$	Reflow $k=3$
Product 1	$LS(1)$ [product]	-	-	-	-
	$1/p_r^{k,1}$ [s]	-	10 ± 0.1	10 ± 0.1	10
	$\lambda^{k,1}$ [s]	-	60 ± 5	60 ± 5	-
Product 2	$LS(2)$ [product]	-	-	-	-
	$1/p_r^{k,2}$ [s]	-	10 ± 0.1	10 ± 0.1	10
	$\lambda^{k,2}$ [s]	-	60 ± 5	60 ± 5	-
Product 3	$LS(3)$ [product]	-	-	-	-
	$1/p_r^{k,3}$ [s]	-	10 ± 0.1	10 ± 0.1	10
	$\lambda^{k,3}$ [s]	-	60 ± 5	60 ± 5	-

: Variables (Table 5)

Table 3 Production conditions in scenario 2.

Product No.	variable	Lotsize	facility		
			Printer $k=1$	Mounter $k=2$	Reflow $k=3$
Product 1	$LS(1)$ [product]	20	-	-	-
	$1/p_r^{k,1}$ [s]	-	10 ± 0.1	-	10
	$\lambda^{k,1}$ [s]	-	60 ± 5	60 ± 5	-
Product 2	$LS(2)$ [product]	15	-	-	-
	$1/p_r^{k,2}$ [s]	-	10 ± 0.1	-	10
	$\lambda^{k,2}$ [s]	-	60 ± 5	60 ± 5	-
Product 3	$LS(3)$ [product]	10	-	-	-
	$1/p_r^{k,3}$ [s]	-	10 ± 0.1	-	10
	$\lambda^{k,3}$ [s]	-	60 ± 5	60 ± 5	-

: Variables (Table 5)

Table 4 Production conditions in scenario 3.

Product No.	variable	Lotsize	facility		
			Printer $k=1$	Mounter $k=2$	Reflow $k=3$
Product 1	$LS(1)$ [product]	20	-	-	-
	$1/p_r^{k,1}$ [s]	-	10 ± 0.1	10 ± 0.1	10
	$\lambda^{k,1}$ [s]	-	60 ± 5	-	-
Product 2	$LS(2)$ [product]	15	-	-	-
	$1/p_r^{k,2}$ [s]	-	10 ± 0.1	10 ± 0.1	10
	$\lambda^{k,2}$ [s]	-	60 ± 5	-	-
Product 3	$LS(3)$ [product]	10	-	-	-
	$1/p_r^{k,3}$ [s]	-	10 ± 0.1	10 ± 0.1	10
	$\lambda^{k,3}$ [s]	-	60 ± 5	-	-

: Variables (Table 5)

Table 5 Variables in each scenario.

Scenario 1				Scenario 2			
	Product 1	Product 2	Product 3		Product 1	Product 2	Product 3
1 $LS(x)$ [product]	4	3	2	1 $1/p^{2x}$ [s]	5	6	7
2 $LS(x)$ [product]	8	6	4	2 $1/p^{2x}$ [s]	7	8	9
3 $LS(x)$ [product]	20	15	10	3 $1/p^{2x}$ [s]	9	10	11
4 $LS(x)$ [product]	40	30	20	4 $1/p^{2x}$ [s]	10	11	12
5 $LS(x)$ [product]	200	150	100	5 $1/p^{2x}$ [s]	11	12	13
6 $LS(x)$ [product]	400	300	200	6 $1/p^{2x}$ [s]	13	14	15

Scenario 3			
	Product 1	Product 2	Product 3
1 λ^{2x} [s]	20	30	40
2 λ^{2x} [s]	30	40	50
3 λ^{2x} [s]	40	50	60
4 λ^{2x} [s]	50	60	70
5 λ^{2x} [s]	60	70	80
6 λ^{2x} [s]	70	80	90

4.2 提案する定式の適用

今回の検証では、はんだリフロー設備は段取替えが発生しないため、 $\lambda^3=0$ となる。また、仕掛係数の定義より、 $q^3=1$ となる。

4.2.1 シナリオ 1 における定式の適用

式 (16)、および、Table 1、Table 2 より、シナリオ 1 における各設備のエネルギー原単位は、

$$\begin{aligned}
 U^1 &= q^1 \left(e_r^1 \sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} \frac{1}{p_r^{1,x}} \right) + e_s^1 \sum_{x=1}^n \left(\frac{\lambda^{1,x}}{\sum LS(i)} \right) \right. \\
 &\quad \left. + e_i^1 \left(\frac{1}{p} - q^1 \sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} \frac{1}{p_r^{1,x}} + \frac{\lambda^{1,x}}{\sum LS(i)} \right) \right) \right) \\
 &= q^1 \left(1.25 \sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} 10 \right) + 3.00 \sum_{x=1}^n \left(\frac{180}{\sum LS(i)} \right) \right. \\
 &\quad \left. + 0.20 \left(\frac{1}{p} - q^1 \sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} 10 + \frac{180}{\sum LS(i)} \right) \right) \right) \quad (26)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U^2 &= q^2 \left(e_r^2 \sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} \frac{1}{p_r^{2,x}} \right) + e_s^2 \sum_{x=1}^n \left(\frac{\lambda^{2,x}}{\sum LS(i)} \right) \right. \\
 &\quad \left. + e_i^2 \left(\frac{1}{p} - q^2 \sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} \frac{1}{p_r^{2,x}} + \frac{\lambda^{2,x}}{\sum LS(i)} \right) \right) \right) \\
 &= q^2 \left(3.75 \sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} 10 \right) + 1.50 \sum_{x=1}^n \left(\frac{180}{\sum LS(i)} \right) \right. \\
 &\quad \left. + 0.20 \left(\frac{1}{p} - q^2 \sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} 10 + \frac{180}{\sum LS(i)} \right) \right) \right) \quad (27)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U^3 &= q^3 \left(e_r^3 \sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} \frac{1}{p_r^{3,x}} \right) + e_s^3 \sum_{x=1}^n \left(\frac{\lambda^{3,x}}{\sum LS(i)} \right) \right. \\
 &\quad \left. + e_i^3 \left(\frac{1}{p} - q^3 \sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} \frac{1}{p_r^{3,x}} + \frac{\lambda^{3,x}}{\sum LS(i)} \right) \right) \right) \\
 &= 3.00 \sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} 10 \right) \quad (28)
 \end{aligned}$$

となる。ここで、式 (18) より、設備 k が単独で稼働した場合のスループット p_0^k は、以下ようになる。

$$p_0^1 = \left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} 10 + \frac{180}{\sum LS(i)} \right) \right)^{-1} \quad (29)$$

$$p_0^2 = \left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} 10 + \frac{180}{\sum LS(i)} \right) \right)^{-1} \quad (30)$$

$$p_0^3 = \left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} 10 \right) \right)^{-1} \quad (31)$$

式 (29) ～ (31) より、仕掛係数 q^k は、式 (25) より以下のように求まる。

$$q^1 = \frac{p^1}{p} = \frac{\min\{p_0^1\}}{\min\{p_0^1, p_0^2, p_0^3\}} \quad (32)$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{p_0^1}{p_0^1} = \frac{p_0^1}{p_0^2} = 1 \\
 q^2 &= \frac{p^2}{p} = \frac{\min\{p_0^1, p_0^2\}}{\min\{p_0^1, p_0^2, p_0^3\}} \quad (33)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{p_0^2}{p_0^1} = \frac{p_0^2}{p_0^3} = 1 \\
 q^3 &= 1 \quad (34)
 \end{aligned}$$

また、生産ライン全体のスループット p は、式 (24) より、以下のように求まる。

$$\begin{aligned}
 p &= \min\{p_0^1, p_0^2, p_0^3\} \\
 &= p_0^1 \\
 &= \left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} 10 + \frac{60}{\sum LS(i)} \right) \right)^{-1} \quad (35)
 \end{aligned}$$

以上より、式 (32) ～ (35) を式 (26) ～ (28) に代入することによって、エネルギー原単位 U^k を品種ごとのロットサイズ $LS(x)$ のみを用いて、以下のようにあらわすことができる。

$$\begin{aligned}
 U^1 &= 12.5 \sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} \right) + 540 \sum_{x=1}^n \left(\frac{1}{\sum LS(i)} \right) \\
 &\quad + 0.20 \left(\frac{1}{\left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} 10 + \frac{60}{\sum LS(i)} \right) \right)^{-1}} \right. \\
 &\quad \left. - \sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} 10 + \frac{180}{\sum LS(i)} \right) \right) \quad (36)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U^2 &= 37.5 \sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} \right) + 270 \sum_{x=1}^n \left(\frac{1}{\sum LS(i)} \right) \\
 &\quad + 0.20 \left(\frac{1}{\left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} 10 + \frac{60}{\sum LS(i)} \right) \right)^{-1}} \right. \\
 &\quad \left. - \sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} 10 + \frac{180}{\sum LS(i)} \right) \right) \quad (37)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U^3 &= 30 \sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} \right) \\
 &\quad + 3.00 \left(\frac{1}{\left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} 10 + \frac{60}{\sum LS(i)} \right) \right)^{-1}} \right. \\
 &\quad \left. - 10 \sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} \right) \right) \quad (38)
 \end{aligned}$$

式 (36) ～ (38) より、ロットサイズとエネルギー原単位の関係性に関して定式の適用を行うことができた。

4.2.2 シナリオ2における定式の適用

式 (16)、および、**Table 1**、**Table 3** より、シナリオ2における各設備のエネルギー原単位は、

$$\begin{aligned} U^1 &= q^1 \left(e_r^1 \sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} \frac{1}{p_r^{1,x}} \right) + e_s^1 \sum_{x=1}^n \left(\frac{\lambda^{1,x}}{\sum LS(i)} \right) \right) \\ &\quad + e_i^1 \left(\frac{1}{p} - q^1 \sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} \frac{1}{p_r^{1,x}} + \frac{\lambda^{1,x}}{\sum LS(i)} \right) \right) \\ &= q^1 \left(1.25 \sum_{x=1}^n \left(\frac{4}{9} \frac{1}{p_r^{1,x}} \right) + 12.00 \right) \\ &\quad + 0.20 \left(\frac{1}{p} - q^1 \left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{4}{9} \frac{1}{p_r^{1,x}} \right) - 4.00 \right) \right) \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} U^2 &= q^2 \left(e_r^2 \sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} \frac{1}{p_r^{2,x}} \right) + e_s^2 \sum_{x=1}^n \left(\frac{\lambda^{2,x}}{\sum LS(i)} \right) \right) \\ &\quad + e_i^2 \left(\frac{1}{p} - q^2 \sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} \frac{1}{p_r^{2,x}} + \frac{\lambda^{2,x}}{\sum LS(i)} \right) \right) \\ &= q^2 \left(3.75 \sum_{x=1}^n \left(\frac{1}{3} \frac{1}{p_r^{2,x}} \right) + 6.00 \right) \\ &\quad + 0.20 \left(\frac{1}{p} - q^2 \left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{1}{3} \frac{1}{p_r^{2,x}} \right) - 4.00 \right) \right) \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} U^3 &= q^3 \left(e_r^3 \sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} \frac{1}{p_r^{3,x}} \right) + e_s^3 \sum_{x=1}^n \left(\frac{\lambda^{3,x}}{\sum LS(i)} \right) \right) \\ &\quad + e_i^3 \left(\frac{1}{p} - q^3 \sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} \frac{1}{p_r^{3,x}} + \frac{\lambda^{3,x}}{\sum LS(i)} \right) \right) \\ &= 3.00 \sum_{x=1}^n \left(\frac{2}{9} \frac{1}{p_r^{3,x}} \right) + 3.00 \left(\frac{1}{p} - \sum_{x=1}^n \left(\frac{2}{9} \frac{1}{p_r^{3,x}} \right) \right) \end{aligned} \quad (41)$$

となる。ここで、式 (18) より、設備 k が単独で稼働した場合のスループット p_0^k は、以下のようになる。

$$p_0^1 = \left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{4}{9} \frac{1}{p_r^{1,x}} \right) + 4 \right)^{-1} \quad (42)$$

$$p_0^2 = \left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{1}{3} \frac{1}{p_r^{2,x}} \right) + 4 \right)^{-1} \quad (43)$$

$$p_0^3 = \left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{2}{9} \frac{1}{p_r^{3,x}} \right) \right)^{-1} \quad (44)$$

式 (42) ~ (44) より、仕掛係数 q^k は、式 (25) より以下のように求まる。

$$\begin{aligned} q^1 &= \frac{p^1}{p} = \frac{\min\{p_0^1\}}{\min\{p_0^1, p_0^2, p_0^3\}} \\ &= \frac{p_0^1}{p_0^1} = \frac{p_0^1}{p_0^1} \end{aligned} \quad (45)$$

$$\begin{aligned} q^2 &= \frac{p^2}{p} = \frac{\min\{p_0^1, p_0^2\}}{\min\{p_0^1, p_0^2, p_0^3\}} \\ &= \frac{p_0^2}{p_0^1} = \frac{p_0^2}{p_0^1} \end{aligned} \quad (46)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\min\left\{\left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{4}{9} \frac{1}{p_r^{1,x}}\right) + 4\right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{1}{3} \frac{1}{p_r^{2,x}}\right) + 4\right)^{-1}\right\}}{\min\left\{\left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{4}{9} \frac{1}{p_r^{1,x}}\right) + 4\right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{1}{3} \frac{1}{p_r^{2,x}}\right) + 4\right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{2}{9} \frac{1}{p_r^{3,x}}\right)\right)^{-1}\right\}} \\ q^3 &= 1 \end{aligned} \quad (47)$$

また、生産ライン全体のスループット p は、式 (24) より、以下のように求まる。

$$\begin{aligned} p &= \min\{p_0^1, p_0^2, p_0^3\} \\ &= \min\left\{\left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{4}{9} \frac{1}{p_r^{1,x}}\right) + 4\right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{1}{3} \frac{1}{p_r^{2,x}}\right) + 4\right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{2}{9} \frac{1}{p_r^{3,x}}\right)\right)^{-1}\right\} \end{aligned} \quad (48)$$

以上より、式 (45) ~ (47) を式 (39) ~ (41) に代入することによって、エネルギー原単位 U^k を設備、品種ごとのサイクルタイムのみを用いて、以下のようにならわすことができる。

$$\begin{aligned} U^1 &= \frac{\left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{4}{9} \frac{1}{p_r^{1,x}}\right) + 4\right)^{-1}}{\min\left\{\left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{4}{9} \frac{1}{p_r^{1,x}}\right) + 4\right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{1}{3} \frac{1}{p_r^{2,x}}\right) + 4\right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{2}{9} \frac{1}{p_r^{3,x}}\right)\right)^{-1}\right\}} \\ &\quad \left(1.25 \sum_{x=1}^n \left(\frac{4}{9} \frac{1}{p_r^{1,x}}\right) + 12.00\right) \\ &\quad + 0.20 \left(\frac{1}{\min\left\{\left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{4}{9} \frac{1}{p_r^{1,x}}\right) + 4\right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{1}{3} \frac{1}{p_r^{2,x}}\right) + 4\right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{2}{9} \frac{1}{p_r^{3,x}}\right)\right)^{-1}\right\}} \right. \\ &\quad \left. - \frac{\left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{4}{9} \frac{1}{p_r^{1,x}}\right) + 4\right)^{-1}}{\left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{4}{9} \frac{1}{p_r^{1,x}}\right) - 4\right)} \right) \end{aligned} \quad (49)$$

$$\begin{aligned} U^2 &= \frac{\min\left\{\left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{4}{9} \frac{1}{p_r^{1,x}}\right) + 4\right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{1}{3} \frac{1}{p_r^{2,x}}\right) + 4\right)^{-1}\right\}}{\min\left\{\left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{4}{9} \frac{1}{p_r^{1,x}}\right) + 4\right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{1}{3} \frac{1}{p_r^{2,x}}\right) + 4\right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{2}{9} \frac{1}{p_r^{3,x}}\right)\right)^{-1}\right\}} \\ &\quad \left(3.75 \sum_{x=1}^n \left(\frac{1}{3} \frac{1}{p_r^{2,x}}\right) + 6.00\right) \\ &\quad + 0.20 \left(\frac{1}{\min\left\{\left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{4}{9} \frac{1}{p_r^{1,x}}\right) + 4\right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{1}{3} \frac{1}{p_r^{2,x}}\right) + 4\right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{2}{9} \frac{1}{p_r^{3,x}}\right)\right)^{-1}\right\}} \right. \\ &\quad \left. - \frac{\min\left\{\left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{4}{9} \frac{1}{p_r^{1,x}}\right) + 4\right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{1}{3} \frac{1}{p_r^{2,x}}\right) + 4\right)^{-1}\right\}}{\left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{1}{3} \frac{1}{p_r^{2,x}}\right) - 4\right)} \right) \end{aligned} \quad (50)$$

$$\begin{aligned} U^3 &= \frac{\min\left\{\left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{4}{9} \frac{1}{p_r^{1,x}}\right) + 4\right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{1}{3} \frac{1}{p_r^{2,x}}\right) + 4\right)^{-1}\right\}}{\min\left\{\left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{4}{9} \frac{1}{p_r^{1,x}}\right) + 4\right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{1}{3} \frac{1}{p_r^{2,x}}\right) + 4\right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{2}{9} \frac{1}{p_r^{3,x}}\right)\right)^{-1}\right\}} \\ &\quad \left(3.75 \sum_{x=1}^n \left(\frac{1}{3} \frac{1}{p_r^{2,x}}\right) + 6.00\right) \\ &\quad + 0.20 \left(\frac{1}{\min\left\{\left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{4}{9} \frac{1}{p_r^{1,x}}\right) + 4\right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{1}{3} \frac{1}{p_r^{2,x}}\right) + 4\right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{2}{9} \frac{1}{p_r^{3,x}}\right)\right)^{-1}\right\}} \right. \\ &\quad \left. - \frac{\min\left\{\left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{4}{9} \frac{1}{p_r^{1,x}}\right) + 4\right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{1}{3} \frac{1}{p_r^{2,x}}\right) + 4\right)^{-1}\right\}}{\left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{1}{3} \frac{1}{p_r^{2,x}}\right) - 4\right)} \right) \end{aligned} \quad (51)$$

式 (49) ~ (51) より、ロットサイズとエネルギー原単位の関係性に関して定式の適用を行うことができた。

4.2.3 シナリオ 3 における定式の適用

式 (16)、および、**Table 1**、**Table 4** より、シナリオ 3 における各設備のエネルギー原単位は、

$$\begin{aligned} U^1 &= q^1 \left(e_r^1 \sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} \frac{1}{p_r^{1,x}} \right) + e_s^1 \sum_{x=1}^n \left(\frac{\lambda^{1,x}}{\sum LS(i)} \right) \right) \\ &\quad + e_i^1 \left(\frac{1}{p} - q^1 \sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} \frac{1}{p_r^{1,x}} + \frac{\lambda^{1,x}}{\sum LS(i)} \right) \right) \\ &= q^1 \left(12.50 + 3.00 \sum_{x=1}^n \left(\frac{\lambda^{1,x}}{45} \right) \right) \\ &\quad + 0.20 \left(\frac{1}{p} - q^1 \left(10 + \sum_{x=1}^n \left(\frac{\lambda^{1,x}}{45} \right) \right) \right) \end{aligned} \quad (52)$$

$$\begin{aligned} U^2 &= q^2 \left(e_r^2 \sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} \frac{1}{p_r^{2,x}} \right) + e_s^2 \sum_{x=1}^n \left(\frac{\lambda^{2,x}}{\sum LS(i)} \right) \right) \\ &\quad + e_i^2 \left(\frac{1}{p} - q^2 \sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} \frac{1}{p_r^{2,x}} + \frac{\lambda^{2,x}}{\sum LS(i)} \right) \right) \\ &= q^2 \left(37.50 + 1.50 \sum_{x=1}^n \left(\frac{\lambda^{2,x}}{45} \right) \right) \\ &\quad + 0.20 \left(\frac{1}{p} - q^2 \left(10 + \sum_{x=1}^n \left(\frac{\lambda^{2,x}}{45} \right) \right) \right) \end{aligned} \quad (53)$$

$$\begin{aligned} U^3 &= q^3 \left(e_r^3 \sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} \frac{1}{p_r^{3,x}} \right) + e_s^3 \sum_{x=1}^n \left(\frac{\lambda^{3,x}}{\sum LS(i)} \right) \right) \\ &\quad + e_i^3 \left(\frac{1}{p} - q^3 \sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} \frac{1}{p_r^{3,x}} + \frac{\lambda^{3,x}}{\sum LS(i)} \right) \right) \\ &= 30.0 + 3.00 \left(\frac{1}{p} - 10 \right) \end{aligned} \quad (54)$$

となる。ここで、式 (18) より、設備 k が単独で稼働した場合のスループット p_0^k は、以下のようになる。

$$p_0^1 = \left(\sum_{x=1}^n \left(10 + \frac{\lambda^{1,x}}{45} \right) \right)^{-1} \quad (55)$$

$$p_0^2 = \left(\sum_{x=1}^n \left(10 + \frac{\lambda^{2,x}}{45} \right) \right)^{-1} \quad (56)$$

$$p_0^3 = 10^{-1} \quad (57)$$

式 (55) ～ (57) より、仕掛係数 q^k は、式 (25) より以下のように求まる。

$$\begin{aligned} q^1 &= \frac{p^1}{p} = \frac{\min\{p_0^1\}}{\min\{p_0^1, p_0^2, p_0^3\}} \\ &= \frac{\left(\sum_{x=1}^n \left(10 + \frac{\lambda^{1,x}}{45} \right) \right)^{-1}}{\min\left\{ \left(\sum_{x=1}^n \left(10 + \frac{\lambda^{1,x}}{45} \right) \right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(10 + \frac{\lambda^{2,x}}{45} \right) \right)^{-1}, 10^{-1} \right\}} \end{aligned} \quad (58)$$

$$\begin{aligned} q^2 &= \frac{p^2}{p} = \frac{\min\{p_0^1, p_0^2\}}{\min\{p_0^1, p_0^2, p_0^3\}} \\ &= \frac{\min\left\{ \left(\sum_{x=1}^n \left(10 + \frac{\lambda^{1,x}}{45} \right) \right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(10 + \frac{\lambda^{2,x}}{45} \right) \right)^{-1} \right\}}{\min\left\{ \left(\sum_{x=1}^n \left(10 + \frac{\lambda^{1,x}}{45} \right) \right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(10 + \frac{\lambda^{2,x}}{45} \right) \right)^{-1}, 10^{-1} \right\}} \end{aligned} \quad (59)$$

$$q^3 = 1 \quad (60)$$

また、生産ライン全体のスループット p は、式 (24) より、以下のように求まる。

$$\begin{aligned} p &= \min\{p_0^1, p_0^2, p_0^3\} \\ &= p_0^1 \\ &= \left(\sum_{x=1}^n \left(\frac{LS(x)}{\sum LS(i)} 10 + \frac{60}{\sum LS(i)} \right) \right)^{-1} \end{aligned} \quad (61)$$

以上より、式 (58) ～ (60) を式 (52) ～ (54) に代入することによって、エネルギー原単位 U^k を設備、品種ごとの段取時間のみを用いて、以下のようにあらわすことができる。

$$\begin{aligned} U^1 &= \frac{\left(\sum_{x=1}^n \left(10 + \frac{\lambda^{1,x}}{45} \right) \right)^{-1}}{\min\left\{ \left(\sum_{x=1}^n \left(10 + \frac{\lambda^{1,x}}{45} \right) \right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(10 + \frac{\lambda^{2,x}}{45} \right) \right)^{-1}, 10^{-1} \right\}} \\ &\quad \left(12.50 + 3.00 \sum_{x=1}^n \left(\frac{\lambda^{1,x}}{45} \right) \right) \\ &\quad + 0.20 \left(\frac{1}{\min\left\{ \left(\sum_{x=1}^n \left(10 + \frac{\lambda^{1,x}}{45} \right) \right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(10 + \frac{\lambda^{2,x}}{45} \right) \right)^{-1}, 10^{-1} \right\}} \right. \\ &\quad \left. - \frac{\left(\sum_{x=1}^n \left(10 + \frac{\lambda^{1,x}}{45} \right) \right)^{-1}}{\min\left\{ \left(\sum_{x=1}^n \left(10 + \frac{\lambda^{1,x}}{45} \right) \right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(10 + \frac{\lambda^{2,x}}{45} \right) \right)^{-1}, 10^{-1} \right\}} \right) \end{aligned} \quad (62)$$

$$\begin{aligned} U^2 &= \frac{\min\left\{ \left(\sum_{x=1}^n \left(10 + \frac{\lambda^{1,x}}{45} \right) \right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(10 + \frac{\lambda^{2,x}}{45} \right) \right)^{-1} \right\}}{\min\left\{ \left(\sum_{x=1}^n \left(10 + \frac{\lambda^{1,x}}{45} \right) \right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(10 + \frac{\lambda^{2,x}}{45} \right) \right)^{-1}, 10^{-1} \right\}} \\ &\quad \left(37.50 + 1.50 \sum_{x=1}^n \left(\frac{\lambda^{2,x}}{45} \right) \right) \\ &\quad + 0.20 \left(\frac{1}{\min\left\{ \left(\sum_{x=1}^n \left(10 + \frac{\lambda^{1,x}}{45} \right) \right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(10 + \frac{\lambda^{2,x}}{45} \right) \right)^{-1}, 10^{-1} \right\}} \right. \\ &\quad \left. - \frac{\min\left\{ \left(\sum_{x=1}^n \left(10 + \frac{\lambda^{1,x}}{45} \right) \right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(10 + \frac{\lambda^{2,x}}{45} \right) \right)^{-1} \right\}}{\min\left\{ \left(\sum_{x=1}^n \left(10 + \frac{\lambda^{1,x}}{45} \right) \right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(10 + \frac{\lambda^{2,x}}{45} \right) \right)^{-1}, 10^{-1} \right\}} \right) \end{aligned} \quad (63)$$

$$\begin{aligned} U^3 &= 30.0 \\ &\quad + 3.00 \left(\frac{1}{\min\left\{ \left(\sum_{x=1}^n \left(10 + \frac{\lambda^{1,x}}{45} \right) \right)^{-1}, \left(\sum_{x=1}^n \left(10 + \frac{\lambda^{2,x}}{45} \right) \right)^{-1}, 10^{-1} \right\}} - 10 \right) \end{aligned} \quad (64)$$

式 (62) ～ (64) より、ロットサイズとエネルギー原単位の関係性に関して定式の適用を行うことができた。

したがって、式 (36) ～ (38)、(49) ～ (51)、(62) ～ (64) より、提案した定式から各シナリオにおける生産条件とエネルギー原単位の関係性を示した。

4.3 提案する定式の検証

本節では、提案した定式とシミュレーションによる仮想的実データを比較し、妥当性の検証を行う。

シナリオ 1 において、式 (36) ～ (38) より算出した値とシミュレーションによる仮想的実データの比較を **Fig.6** に示す。横軸は品種ごとのロットサイズの平均の逆数、縦軸はエネルギー原単位をあらわしている。また、図中の直線は定式、マーカーは仮

想の実データをあらわしている。

シナリオ2において、今回はマウンター設備のみ品種ごとに各設備のサイクルタイムが異なる場合を考慮する。式(49)～(51)より算出した値とシミュレーションによる仮想的実データの比較をFig.7に示す。横軸はマウンター設備における品種ごとのサイクルタイムの平均、縦軸はエネルギー原単位をあらわしている。また、図中の直線は定式、マーカーは仮想的実データをあらわしている。

シナリオ3において、今回はマウンター設備のみ品種ごとに各設備の段取時間が異なる場合を考慮する。式(62)～(64)より算出した値とシミュレーションによる仮想的実データの比較をFig.8に示す。横軸はマウンター設備における品種ごとの段取時間の平均、縦軸はエネルギー原単位をあらわしている。また、図中の直線は定式、マーカーは仮想的実データをあらわしている。

Fig.6、Fig.7、およびFig.8において、算出した値がシミュレーションによる仮想的実データと良く一致することから、多品種少量生産ラインにおける生産条件とエネルギー原単位の関係性に関する定式の妥当性を確認することができた。したがって、多品種少量生産ラインにおける生産条件とエネルギー原単位の関係性を生産ラインの基本情報のみを用いて定式化することができた。また、Fig.6 から、ロットサイズが小さくなるにつれて、段取回数が増加するためエネルギー原単位が増加することがわかる。Fig.7 から、生産ライン上のある設備のサイクルタイムが大きくなると、他の設備のスループットが下がり、エネルギー原単位が増加することがわかる。Fig.8 から、生産ライン上のある設備の段取時間が大きくなると、他の設備のスループットが下がり、エネルギー原単位が増加することがわかる。したがって、ある設備のサイクルタイム、段取時間が他の設備のエネルギー原単位に与える影響を定量的に評価できた。

5. 結言

本論文では、多品種少量生産ラインにおいて、品種ごとに異なる生産条件とエネルギー原単位の関係性について理論的な定式化を行った。生産条件とは、ロットサイズ、各設備のサイクルタイム、および各設備の段取時間である。また、プリント基板製造ラインを対象にケーススタディを実施し、提案する理論の妥当性について検証を行った。その結果、シミュレーションによる仮想的実データと提案した定式を比較し、良い一致を得ることができた。すなわち、生産システムの設計、改善段階において、生産ラインの基本情報から、事前にエネルギー原単位を算出

でき、意思決定者の支援を行うことができる手法を提案することができた。

また、今後の展望としては、品種ごとに異なる消費エネルギー量の考慮やバッファサイズの有限化に関する考慮を行っていく予定である。

Fig.6 Virtual actual data (dots) and theoretical value (lines) in scenario 1

Fig.7 Virtual actual data (dots) and theoretical value (lines) in scenario 2

Fig.8 Virtual actual data (dots) and theoretical value (lines) in scenario 3

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁, エネルギーの使用の合理化等に関する法律 省エネ法の概要, available from <http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/summary/pdf/2014_gaiyo.pdf>(2016 年 12 月 1 日).
- 2) 資源エネルギー庁, エネルギー基本計画, available from<http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/140411.pdf>.(2018 年 4 月 6 日)
- 3) United Nations Framework Convention on Climate Change, Adoption of the Paris agreement, available from <<http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>>(2016 年 12 月 1 日).
- 4) 経済産業省, エネルギー革新戦略, available from <<http://www.meti.go.jp/press/2016/04/20160419002/20160419002-2.pdf>>(2016 年 12 月 1 日).
- 5) H. Kim, S. S. Lee, J. H. Park, and J. G. Lee, “A model for a simulation-based shipbuilding system in a shipyard manufacturing process”, International Journal of Computer Integrated manufacturing, 18-6(2005)427-441.
- 6) H. Kim, J. G. Lee, S. S. Lee, and J. H. Park, “A simulation-based Shipbuilding System for Evaluation of Validity in Design and Manufacturing,” IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 1(2003)522-529.
- 7) C. McLean, F. Riddick, and Y. Tina, “An architecture and interfaces for distributed manufacturing simulation”, Simulation, 81-1(2005)15-32.
- 8) K. Mitsuyuki, F. Kojima, H. Douba, Y. Fukuda, and E. Arai, “Simulation to design and improve Kanban system”, CIRP J. manufacturing systems, 33(2004)200-206.
- 9) E. Williams, and H. Celik, “Analysis of conveyor systems within automotive final assembly”, Proceedings of the 1998 conference on Winter simulation,(1998)915-920,.
- 10) C. Herrmann, S. Thiede, S. Karab, and J. Hesselbach, “Energy oriented simulation of manufacturing systems – Concept and application”, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 60-1(2011)45-48.
- 11) H. Hibino, “Method to control manufacturing cell by driving simulation model”, International Journal of Automation Technology, 8-4(2014)539-549.
- 12) H. Hibino, Y. Fukuda, and Y. Yura, “A Synchronization Mechanism with Shared Storage Model for Distributed Manufacturing Simulation Systems”, International Journal of Automation Technology, 9-3(2015)248-260.
- 13) Wilson, J., Arokiam A., Belaidi, H. and Ladbroke, J., A simple energy usage toolkit from manufacturing simulation data, Journal of Cleaner Production, 122(2016)266-276.
- 14) He, Y., Liu, B., Zhang, X., Gao, H. and Liu, X., A modeling method of task-oriented energy consumption for machining manufacturing system, Journal of Cleaner Production, 23(2012)167-174.
- 15) 日比野浩典, 生産システムの設計・改善・運用段階における環境評価とシミュレーション技術の最新動向, シミュレーション, 33-3(2014)25-34.
- 16) 佐久間徹, 日比野浩典, 山口誠, 生産システム設計・改善時における生産性と消費エネルギー量のシミュレーションシステム, 日本機械学会論文集 C 編, 79-798(2013)28-39.
- 17) Hibino, H., Sakuma, T. and Yamaguchi, M., Manufacturing system simulation for evaluation of productivity and energy consumption, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 8-2(2014).
- 18) 山口 誠, 小林高之, 日比野浩典, “生産システム設計・改善時における生産性と消費エネルギー量のシミュレーションシステム (エネルギー原単位とスループットの定式化に関する考察)”, 日本機械学会論文集, 82-835(2016).
- 19) 小林高之, 山口 誠, 日比野浩典, “生産システム設計・改善時における生産性と消費エネルギー量のシミュレーションシステム (設備故障を考慮する場合のエネルギー原単位のロットサイズ依存に関する研究)”, 日本機械学会論文集, 82-835(2016).
- 20) T. Kobayashi, M. Yamaguchi, and H. Hibino “Lot Size Dependence for Energy Consumption per Unit of Production Throughput Considering Breakdown States in Manufacturing Line” ,Proceeding of the ACDDE2015 (Asian Conference on Design and Engineering 2015), 15-211(2015)54.
- 21) 経済産業省, 厚生労働省, 文部科学省, 平成 2

7年度 ものづくり基盤技術の振興施策
<http://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mo-no/2016/honbun_pdf/pdf/gaiyou.pdf>(2018年
4月6日).

22) 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社,

WITNESS, 伊藤忠テクノソリューションズの
科学・工学系情報サイト, available from
<[http:// www.engineering-
eye.com/WITNESS/](http://www.engineering-eye.com/WITNESS/)>(2018年4月6日).

代表者メールアドレス

日比野浩典 hibino@rs.tus.ac.jp