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)

山口 誠^{*1}, 小林 高之^{*2}, 日比野 浩典^{*3}**Manufacturing system simulation to evaluate energy productivity
(Formulation of relationship between productivity and energy consumption)**Makoto YAMAGUCHI^{*1}, Takayuki KOBAYASHI^{*2} and Hironori HIBINO^{*3}^{*1} Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering and Resource Science, Akita University
1-1 Tegatagakuen-cho, Akita-shi, Akita 010-8502, Japan^{*2} Department of Industrial Administration, Graduate School of Science and Technology, Tokyo University of Science
2641 Yamazaki, Noda-shi, Chiba 278-8510, Japan^{*3} Department of Industrial Administration, Faculty of Science and Technology, Tokyo University of Science
2641 Yamazaki, Noda-shi, Chiba 278-8510, Japan

Received 11 September 2015

Abstract

It is more important to evaluate and reduce energy consumption in designing, operating, and improving systems in industry. Therefore production management methods concurrently considering productivity and energy consumption are needed. Moreover, it is required to maintain a high productivity when energy consumption are reduced. In order to approach the theoretical realization of the production conditions that affect a productivity or energy consumption, we investigate the formulation of the relationship between energy consumption and production throughput, and verify it by using numerical simulation. The dependence of energy consumption per unit of production throughput on lot size, and the relationship between energy consumption per unit of production throughput and throughput are clearly shown.

Key words : Manufacturing system simulation, Energy consumption, Productivity, Manufacturing system design**1. 緒 言**

エネルギー利用の合理化は、あらゆる分野において必須の課題として、様々な取り組みがなされており、製造業においても、省エネルギー、CO₂排出量の削減は不可欠の課題となっている(Goschel et al., 2012, 日産自動車(株), 2011, 富士通(株), 2012). 特にエネルギーの消費量が多い生産工場における消費電力の管理は早急の課題である. 他方で、生産工場では、高い生産性が求められている. そこで、近年、生産性を一定水準に保ちながらも、消費エネルギーの削減を実現することが望まれている.

生産システムシミュレーションを利用した生産性の評価への取り組みが行われているが (Hibino et al., 2006; Hibino and Fukuda, 2006; Hibino and Fukuda, 2008; Kim et al., 2005, McLean et al., 2005, Mitsuyuki et al., 2004, Williams and Celik, 1998), 消費エネルギーに関しては、工作機械単体 (成田他, 2005, 當麻他, 2003), AGV (Automated Guided

No.15-00495 [DOI:10.1299/transjsme.15-00495], J-STAGE Advance Publication date : 18 March, 2016

^{*1} 正員, 秋田大学 工学資源学研究科機械工学専攻 (〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1)^{*2} 学生員, 東京理科大学 理工学研究科経営工学専攻 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)^{*3} 正員, 東京理科大学 理工学部経営工学科

E-mail of corresponding author: yamaguchi@phys.akita-u.ac.jp

Vehicle) を対象にしたもの(村山他, 2005)などがあるのみで, 取り組みが多くない. このことから, 以前の研究において, 生産性と消費エネルギーの事前評価に着目し, その要件の整理, 生産性と消費エネルギーの事前評価のためのシミュレーション手法, UML モデルによるモデル化を提案し, 生産性とあわせて消費エネルギーを評価できるシミュレーションシステムを構築した (Hibino et al., 2014a, 2014b). さらに, 半導体生産ラインにおけるロットサイズとエネルギー原単位についてシミュレーションを行い, ロットサイズが小さいとエネルギー原単位が大きくなり, ロットサイズが大きくなるにつれ, エネルギー原単位が一定値に収束するという結果を得た(佐久間他, 2012). これは, ロットサイズが小さいと段取り替え回数が増え, 段取り替えに要する時間分だけエネルギー原単位が大きくなるということで, 定性的には理解することができた. しかしながら, ロットサイズなどの生産システムにおける各種生産条件が, 生産性とエネルギー消費にどのように影響を及ぼすのかについての理論的な理解は進展していない.

本研究では, 生産性とエネルギー消費の関係についての理論的知見を得ることを目的とし, 製造エネルギーとスループットおよびロットサイズとの関係性について定式化を試みる. さらに, 生産システムシミュレーションを用いた定式化の妥当性を検証を行う. 特に, これまでに得られているエネルギー原単位のロットサイズに着目し, ロットサイズを変化させた際のエネルギー原単位の振る舞いについて考察する. さらに, エネルギー原単位スループットや各種生産条件との関連性について議論を行う.

2. エネルギー原単位とスループットの定式化

2・1 エネルギー原単位

製造のために消費する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, 産業界ではエネルギー原単位の利用が進展している (日産自動車㈱, 2011, 富士通㈱, 2012, YKK AP 株式会社, 2015). エネルギー原単位 U は, 総生産個数 P [個], および, 総消費エネルギー E [J] により,

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

とあらわされる. エネルギー原単位の単位は [J/個] であり, 消費エネルギーの単位は [Ws], [Wh], [kWh] などを用いることもある. 消費エネルギーと生産個数は単位時間 (評価時間分割単位) あたりの量を用いたほうが有用な場合がある. 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) とよぶ. 単位時間は, 解析目的にあわせて選択することになり, 週, 日, 時, 分, 秒単位などが代表的な単位時間である. 単位時間として秒 (s) を用いると, スループットの単位は [個/s] となる.

2・2 消費エネルギー

設備の個数が n , 設備にはその種類によらず m 通りの状態があるとする. 設備 k の運転時間 T^k と, 工場またはライン全体の総運転時間 T は等しいとし, 総運転時間の間, 全て設備は常にいずれかの状態を属するとする. 運転時間について模式的に示したものが図 1 である. つまり, 設備 k が状態 x にいる総時間を T_x^k とすると, 図 1 からわかるように T は,

$$T = T^k = \sum_x^m T_x^k \quad (2)$$

となる. 設備 k の状態 x における消費電力を e_x^k とすると, 総消費エネルギーは,

$$E = \sum_k^n E^k = \sum_k^n \sum_x^m e_x^k T_x^k \quad (3)$$

となる. ここで, E^k は設備 k の総消費エネルギーである. これより, エネルギー原単位は,

$$U = \sum_k^n U^k = \sum_k^n \frac{E^k}{P} = \sum_k^n \sum_x^m \frac{e_x^k T_x^k}{P} \quad (4)$$

となる．ここで、 U^k は設備 k のエネルギー原単位である．設備 k が状態 x に属する総時間 T_x^k と総生産量 P がわかると、エネルギー原単位を求めることができる．

Fig. 1 Operating time of state of x in k -th facility, T_x^k

2・3 仕掛係数

生産システムにおいて、一般的に設備間にバッファがあり、設備間のアンバランスや、滞りが発生するような場合には、シミュレーション終了時にバッファにワークが存在することになる．そのため、総生産量 P と、各設備の生産量 P^k は一致せず、 $P^k > P$ となる．ここで、各設備の生産量 P^k を総生産量 P で割り算した値、

$$q^k \equiv \frac{P^k}{P} \quad (5)$$

を、設備 k における仕掛係数と定義する．各設備の生産量は総生産量が同じであれば、 $q^k = 1$ 、各設備の生産量は総生産量よりも大きければ、 $q^k > 1$ となる．また、 q^k は前行程にいくほど大きくなり、

$$q^1 \geq \dots \geq q^{k-1} \geq q^k \geq q^{k+1} \geq \dots \geq q^n = 1 \quad (6)$$

の性質をもつ．前述したように、シミュレーション終了時に全てのバッファ仕掛品がないとき、総生産量と各設備の生産量は等しくなるので、

$$q^1 = \dots = q^{k-1} = q^k = q^{k+1} = \dots = q^n = 1 \quad (7)$$

となる．例えば、シミュレーション終了時に設備 k と設備 $k+1$ の間のバッファのみに製品が残っている時には、

$$q^1 = \dots = q^{k-1} = q^k > q^{k+1} = \dots = q^n = 1 \quad (8)$$

となり、設備 k の性能が悪くボトルネックになっていることになる．

設備 k におけるバッファサイズ 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、

$$\begin{aligned} q^k = \frac{P^k}{P} &\leq \frac{P^{k+1} + N_{buf}^k}{P} \leq \frac{P^{k+2} + N_{buf}^k + N_{buf}^{k+1}}{P} \\ &\leq \frac{P^n + N_{buf}^k + N_{buf}^{k+1} \dots N_{buf}^{n-1}}{P} = 1 + \frac{N_{buf}^k + N_{buf}^{k+1} \dots N_{buf}^{n-1}}{P} \end{aligned} \quad (9)$$

となり、総生産量 P が大きくなれば、仕掛係数 q^k は1に近づく．仕掛係数および設備、製品の流れを図2模式的に示した．

Fig. 2 Relationship between throughput (P^k) and coefficient of work in process (q^k)

2・4 設備kの状態xの移動時間, T_x^k

本研究では、各設備の状態として、加工状態($x = r$)、段取り状態($x = s$)、そして待機状態($x = i$)の3つの状態を想定し(図3)、設備kの各状態の時間について考察する。スループット p_r^k と加工時間 T_r^k の積が、設備kの生産量 P となることから、

$$T_r^k = \frac{P}{p_r^k} \quad (10)$$

となる。仕掛係数 q^k を考慮すると、

$$T_r^k = q^k \frac{P}{p_r^k} \quad (11)$$

となる。設備kにおける段取り回数は、生産量 $q^k P$ をロットサイズ(LS)で割ると得られる。1回の段取りに要する時間を λ^k とすると、設備kにおける段取り時間は、

$$T_s^k = \frac{P}{LS} \times \lambda^k \quad (12)$$

となる。同様に、仕掛係数 q^k を考慮すると、

$$T_s^k = q^k \frac{P}{LS} \times \lambda^k \quad (13)$$

総時間から加工時間、段取り時間をひくことで待機時間が得られることから、待機時間は、

$$\begin{aligned} T_i^k &= T - T_r^k - T_s^k \\ &= T - \frac{q^k}{p_r^k} P - \frac{q^k \lambda^k}{LS} P \\ &= P \left(\frac{T}{P} - \frac{q^k}{p_r^k} - \frac{q^k \lambda^k}{LS} \right) \\ &= P \left(\frac{1}{p} - \frac{q^k}{p_r^k} - \frac{q^k \lambda^k}{LS} \right). \end{aligned} \quad (14)$$

となる。式(11)、式(13)、式(14)を式(4)に代入すると、

$$\begin{aligned} U^k &= \frac{1}{P} (e_r^k T_r^k + e_s^k T_s^k + e_i^k T_i^k) \\ &= \frac{1}{P} \left(e_r^k \frac{q^k P}{p_r^k} + e_s^k \frac{q^k \lambda^k P}{LS} + e_i^k P \left(\frac{1}{p} - \frac{q^k}{p_r^k} - \frac{q^k \lambda^k}{LS} \right) \right) \\ &= q^k \left(\frac{e_r^k}{p_r^k} + \frac{e_s^k \lambda^k}{LS} \right) + e_i^k \left(\frac{1}{p} - q^k \left(\frac{1}{p_r^k} + \frac{\lambda^k}{LS} \right) \right). \end{aligned} \quad (15)$$

となる．総生産量が十分に大きくて，バッファサイズが有限であるとき，設備 k とその前設備 $k-1$ の仕掛係数の関係は， $q^{k-1} = q^k$ となる．このとき，仕掛係数の関係だけでは，設備 k の待機時間の発生の有無は判断できない．一方，バッファサイズが無限であるとき，仕掛係数の関係は， $q^{k-1} = q^k$ と $q^{k-1} > q^k$ の2通り考えられる． $q^{k-1} = q^k$ の場合は，設備 $k-1$ の性能が悪く設備 k では待機時間が発生する． $q^{k-1} > q^k$ の場合は，設備 k に十分ワークが供給されてる状況であることから，設備 k には，待機時間が発生しない．このとき，式15において，第2項の括弧の中が0になる．これより，ライン全体のスループットが

$$\frac{1}{p} = q^k \left(\frac{1}{p_r^k} + \frac{\lambda^k}{LS} \right). \quad (16)$$

となることがわかる．設備 k において待機時間が発生する場合，式15の第2項の括弧の中が零にならないことから，待機時間が発生しない場合と比べて，第2項の分だけエネルギー原単位が増加する．

Fig. 3 State transition model of k-th facility

3. 定式化を検証するためのシミュレーション

3・1 シミュレーションシステム

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，ワークなどの流れ方と，生産指示情報などの情報の流れ方を離散的に時刻を進めながら擬似実現を可能とする．すなわち，実際の生産システムにおいて，ワークが必要とする処理時間を経過を追いながら設備を順次移動していく様子を，模擬的に実験することができる．設備の処理時間や故障間隔などは乱数を利用して確率的に変動可能なため，設備の処理時間の変動や故障などの影響により，ワークが流れない停滞現象など対象システムの動的な挙動評価を可能とする．

以前の研究において，生産性と消費エネルギーの事前評価の要件の整理，生産性と消費エネルギーの事前評価のためのシミュレーション手法を提案，UML モデルによるモデル化を提案し，市販の生産システムシミュレーションである Witness (伊藤忠テクノソリューションズ株, 2011) をベースにシミュレーションシステムを構築した．本研究では，この構築したシミュレーションシステムを用いて行った．

3・2 シミュレーションの条件

はんだ印刷設備 ($k = 1$)，マウンター設備 ($k = 2$)，はんだリフロー設備 ($k = 3$) の3種類の設備で構成される半導体製造ラインを想定したシミュレーションを行った．想定した半導体製造ラインモデルを図4に示す．シミュレーションに用いた各種変数値を表1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乱数を用いて変数を正規分布させている．設備のスループットおよび段取り時間の標準偏差はそれぞれ ± 0.1 秒， ± 10 秒である．炉内環境を常に $250 \pm 2.5^\circ\text{C}$ の範囲で温度を保持することを想定し，そのための実際の温度制御を参照にして， 0.167°C/s で上昇， 0.056°C/s で下降するものとし，消費電力はそれぞれ 6.0 kW，2.0 kW で平均すると 3 kW となる．各設備間のバッファは無量大，故障は発生しないものとする．シミュレーション期間は5 日分 (8 時

間×5 日), また, ワークは4 種類とし, ロットサイズ LS は, 15, 30, 90, 360 個で行った. また, 今回の検証で想定している半導体製造製造ラインは直列で結ばれているものとする.

Fig. 4 Simulation model of the middle-scale semiconductor manufacturing line.

Table 1 Input data in simulation.

input data		Facility			
		printing $k=1$	mounter $k=2$	reflow $k=3$	
$1/p_r^k$	[s]	10 ± 0.1	10 ± 0.1	10 ± 0.1	
e_r^k	[kW]	1.25	3.75	3.0*	*6.0 (rising), 2.0 (falling)
λ^k	[s]	120 ± 10	120 ± 10	-	
e_s^k	[kW]	3	1.5	-	
e_i^k	[kW]	0.2	0.2	3.0*	*6.0 (rising), 2.0 (falling)

4. シミュレーション結果と定式化の検証

図5に, 横軸がロットサイズの逆数, 縦軸がエネルギー原単位 $U^1 \sim U^3$ のシミュレーション結果を Δ , $\circ$, $\square$ でそれぞれ示す. エネルギー原単位がロットサイズの逆数と比例関係にあることがわかる. 各設備のエネルギー原単位を式(15)を用いて書き表すと,

$$U^1 = q^1 \left(\frac{e_r^1}{p_r^1} + \frac{e_s^1 \lambda^1}{LS} \right) + e_i^1 \left(\frac{1}{p} - q^1 \left(\frac{1}{p_r^1} + \frac{\lambda^1}{LS} \right) \right) \quad (17)$$

$$U^2 = q^2 \left(\frac{e_r^2}{p_r^2} + \frac{e_s^2 \lambda^2}{LS} \right) + e_i^2 \left(\frac{1}{p} - q^2 \left(\frac{1}{p_r^2} + \frac{\lambda^2}{LS} \right) \right) \quad (18)$$

$$U^3 = q^3 \frac{e_r^3}{p_r^3} + e_i^3 \left(\frac{1}{p} - q^3 \frac{1}{p_r^3} \right) \quad (19)$$

となる．ここではんだリフロー設備は段取り替えがないことから $\lambda^3 = 0$ とした．仕掛係数の定義より $q^3 = 1$ である．バッファサイズが無限であること，および，はんだ印刷設備にはワークが十分供給されることから，はんだ印刷設備に待機時間が発生せず，式(17)の第2項の括弧の中が零になる．よって，

$$\frac{1}{p} = q^1 \left(\frac{1}{p_r^1} + \frac{\lambda^1}{LS} \right) \quad (20)$$

となる．マウンター設備とはんだリフロー設備の仕掛係数の関係について考えると，2つ設備のサイクルタイムが同じであり，マウンター設備にのみ段取り替えが発生することから，後工程の設備の生産能力が高い，つまり2つの設備の生産量が等しくなるといえる．よって， $q^2 = q^3$ となる，つまり， $q^2 = 1$ となる．次にはんだ印刷設備とマウンター設備の仕掛係数の関係について考える．仕掛係数の定義より，一般に，(i) $q^1 = q^2$ の場合と，(ii) $q^1 > q^2$ の場合とがある．(i)はマウンター設備の生産能力がはんだ印刷設備の生産能力よりも大きい，もしくは等しい場合であり，(ii)はマウンター設備の生産能力がはんだ印刷設備の生産能力よりも小さい場合である．(i)

$q^1 = q^2$ の場合，仕掛係数は，

$$q^1 = q^2 = q^3 = 1 \quad (21)$$

となる．これらより，

$$\frac{1}{p} = \frac{1}{p_r^1} + \frac{\lambda^1}{LS} \quad (22)$$

$$U^1 = \frac{e_r^1}{p_r^1} + \frac{e_s^1 \lambda^1}{LS} \quad (23)$$

$$U^2 = \left(\frac{e_r^2}{p_r^2} + \frac{e_s^2 \lambda^2}{LS} \right) + e_i^2 \left(\left(\frac{1}{p_r^1} + \frac{\lambda^1}{LS} \right) - \left(\frac{1}{p_r^2} + \frac{\lambda^2}{LS} \right) \right) \quad (24)$$

$$U^3 = \frac{e_r^3}{p_r^3} + e_i^3 \left(\frac{1}{p_r^1} + \frac{\lambda^1}{LS} - \frac{1}{p_r^3} \right) \quad (25)$$

となる．リフロー設備では段取り替えがないにもかかわらず，スループットのロットサイズ依存性の式(22)より， U^3 がロットサイズに依存することが陽に示された．(ii) $q^1 > q^2$ の場合には，マウンター設備にワークが十分供給されることから，マウンター設備2に待機時間が発生せず，式(18)の第2項の括弧の中が零となることから，

$$\frac{1}{p} = \frac{1}{p_r^2} + \frac{\lambda^2}{LS} \quad (26)$$

$$U^1 = q^1 \left(\frac{e_r^1}{p_r^1} + \frac{e_s^1 \lambda^1}{LS} \right) = \frac{1}{p} \frac{1}{\left(\frac{1}{p_r^1} + \frac{\lambda^1}{LS} \right)} \left(\frac{e_r^1}{p_r^1} + \frac{e_s^1 \lambda^1}{LS} \right) = \frac{1}{p_r^2} + \frac{\lambda^2}{LS} \left(\frac{e_r^1}{p_r^1} + \frac{e_s^1 \lambda^1}{LS} \right) \quad (27)$$

$$U^2 = \frac{e_r^2}{p_r^2} + \frac{e_s^2 \lambda^2}{LS} \quad (28)$$

$$U^3 = \frac{e_r^3}{p_r^3} + e_i^3 \left(q^1 \left(\frac{1}{p_r^1} + \frac{\lambda^1}{LS} \right) - \frac{1}{p_r^3} \right) = \frac{e_r^3}{p_r^3} + e_i^3 \left(\frac{\frac{1}{p_r^2} + \frac{\lambda^2}{LS}}{\frac{1}{p_r^1} + \frac{\lambda^1}{LS}} \left(\frac{1}{p_r^1} + \frac{\lambda^1}{LS} \right) - \frac{1}{p_r^3} \right) \quad (29)$$

となる．なお，はんだ印刷設備とマウンター設備のサイクルタイム，段取り替え時間が等しい場合とする今回のシミュレーション条件においては，式(23)～(25)と式(27)～(29)は同じ式になる．

表1の値を式(23)～(25)に代入した結果を図5の点線で示す．図中のエラーバーはシミュレーションに用いた正規分布している変数の標準偏差を反映したエネルギー原単位の標準偏差であり，その範囲内でシミュレーションの結果と一致していることがわかる．式(21)のスループットとロットサイズの関係式を用いて，式(23)～(25)を，ロットサイズではなく，スループットを用いて表すこともでき，エネルギー原単位とスループットの関係が得られる．この関係性をみるために，ロットサイズを変化させたときの，エネルギー原単位と総スループットのシミュレーション結果を図6に示す． $U^1 \sim U^3$ のシミュレーション結果がそれぞれ△，○，□であり，点線は定式化した式に表

1 の値を代入したものある。定式化により得られた結果とシミュレーションにより得られた結果が一致していることがわかる。これらより、本研究において行った定式化をシミュレーションにより検証することができた。

Fig. 5 LS dependence of U^k . Simulation results (open triangle, open circle, open square) and formulation results (dashed line).

Fig. 6 $1/p$ dependence of U^k . Simulation results (open triangle, open circle, open square) and formulation results (dashed line).

5. 結 言

本研究では、生産性とエネルギー消費の関係についての理論的知見を得ることを目的とし、定式化およびシミュレーションを用いた取り組みを行った。はじめに、エネルギー原単位をスループット、ロットサイズ、各種生産条件を用いて定式化を行った。この定式化により、エネルギー原単位がロットサイズに反比例することを示すことができた。次に、得られた定式化の妥当性を検証するために、生産シミュレーションを行い、その結果と定式化より得られた結果を比較により、定式化とシミュレーションがよく一致することを示すことができた。これによってバッファサイズが無限の場合において、定式化の妥当性を示すことができた。生産システムにおいてエネルギー消費量を削減する上で重要な指数であるエネルギー原単位の定式化は、生産性を保ちながらも、エネルギー消費をおさえたものづくりをする上で重要な知見になりうるものと確信している。

文 献

- 富士通株式会社 環境本部, グリーンものづくりのための経営戦略ツール エネマネ RAGON, FUJITSU, available from <<http://jp.fujitsu.com/about/csr/eco/services/energysaving/emdragon/>> (参照日 2015 年 8 月 20 日).
- Goschel, A., Schieck, F. and Schonherr, J., Method for energy and resource balancing demonstrated as an example of the hot sheet metal production process, CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 61, No. 1(2012), pp.399-402.
- Hibino, H., Sakuma, T. and Yamaguchi, M., Manufacturing System Simulation for Evaluation of Productivity and Energy Consumption. Journal of Advanced Mechanical Design, System, and Manufacturing, Vol.8, No.2(2014a), pp.1-13.
- Hibino, H., Sakuma, T. and Yamaguchi, M., Simulation for Sustainable Manufacturing System Considering Productivity and Energy Consumption. Advances in Production Management Systems. Innovative and Knowledge-Based Production Management in a Global-Local World, IFIP Advances in Information and Communication Technology. Vol.439(2014b), pp.310-318.
- Hibino, H. and Fukuda, Y., A user support system for manufacturing system design using distributed simulation, Production Planning and Control, Vol.17, No.2 (2006), pp.128-142.
- Hibino, H. and Fukuda, Y., Emulation in manufacturing engineering processes, Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference (2008), pp.1785-1793.
- Hibino, H., Inukai, T. and Fukuda, Y., Efficient manufacturing system implementation based on combination between real and virtual factory, International Journal of Production Research, Vol. 44, No. 18 (2006), pp.3897-3915.
- 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 engineering-eye, available from< <http://www.engineering-eye.com/witness/index.html>> (参照日 2015 年 8 月 20 日).
- Kim, H., Lee, S., Park, J. H. and Lee, J. G., A model for a simulation-based shipbuilding system in a shipyard manufacturing process, International Journal of Computer Integrated manufacturing, Vol. 18, No. 6 (2005), pp.427-441.
- 村山昇, 川田誠一, 小口俊樹, 分散環境における場面遷移ネットシミュレーション, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 71, No. 703 (2005), pp. 1054-1061.
- McLean, C., Riddick, F. and Tina, Y., An architecture and interfaces for distributed manufacturing simulation, Simulation, Vol. 81, No. 1(2005), pp. 15-32.
- Mitsuyuki, K., Kojima, F., Douba, H., Fukuda, Y. and Arai, E., Simulation to design and improve Kanban system, CIRP J. manufacturing systems, Vol.33 (2004), pp.200-206.
- 日産自動車株式会社 九州工場 工務部工務課 省エネ推進チーム, エネルギー原単位管理によるムダの抽出と省エネ対策, 一般財団法人 省エネルギーセンター, http://www.jsme.or.jp/publish/ronbun/JSME_Manual_20100730.pdf (参照日 2015 年 8 月 20 日).
- 成田浩久, 河村浩志, 則久孝志, 陳連怡, 藤本英雄, 長谷川孝男, 工作機械のよる加工の環境負荷予測システムの開発 (第 1 報, 環境負荷の算出手法の提案), 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 71, No. 704 (2005), pp. 1392-1399
- 佐久間徹, 日比野浩典, 山口誠, エネルギー生産性のための生産システムシミュレーション(第 2 報, エネルギー原単位による生産計画), 日本機械学会 2012 年度年次大会講演論文集 (2012), S142015.
- 當麻昭次郎, 大森茂俊, 小久保邦雄, 立野昌義, LCA 手法を用いた環境対応加工の環境評価—環境対応旋削加工における二酸化炭素排出量—, 精密工学会, Vol. 69, No. 6 (2003), pp. 825-830.
- Williams, E. and Celik, H., Analysis of conveyor systems within automotive final assembly, Proceedings of the 1998 conference on Winter simulation (1998), pp.915-920.

YKK AP 株式会社, 2014 年度 環境活動報告, ニュースリリース

<<http://www.ykkap.co.jp/company/japanese/news/2015/20150811.html>>, (参照日, 2015 年 8 月 20 日) .

References

- Fujitsu, Co., Green Monodukuri: RAGON, available from
<<http://jp.fujitsu.com/about/csr/eco/services/energysaving/emdragon/>> (accessed on 20 August, 2015) (in Japanese) .
- Goschel , A., Schieck, F. and Schonherr, J., Method for energy and resource balancing demonstrated as an example of the hot sheet metal production process, CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 61, No. 1(2012), pp.399-402.
- Hibino, H., Sakuma, T. and Yamaguchi, M., Manufacturing System Simulation for Evaluation of Productivity and Energy Consumption. Journal of Advanced Mechanical Design, System, and Manufacturing, Vol.8, No.2(2014a), pp.1-13
- Hibino, H., Sakuma, T. and Yamaguchi, M., Simulation for Sustainable Manufacturing System Considering Productivity and Energy Consumption. Advances in Production Management Systems. Innovative and Knowledge-Based Production Management in a Global-Local World, IFIP Advances in Information and Communication Technology. Vol.439(2014b), pp.310-318.
- Hibino, H. and Fukuda, Y., A user support system for manufacturing system design using distributed simulation, Production Planning and Control, Vol.17, No.2 (2006), pp.128-142.
- Hibino, H. and Fukuda, Y., Emulation in manufacturing engineering processes, Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference (2008), pp.1785-1793.
- Hibino, H., Inukai, T. and Fukuda, Y., Efficient manufacturing system implementation based on combination between real and virtual factory, International Journal of Production Research, Vol. 44, No. 18 (2006), pp.3897-3915.
- Itouchu Techno Solutions Co., WITNESS, engineering-eye, available from
<<http://www.engineering-eye.com/witness/index.html> >(accessed on 20 August, 2015) (in Japanese).
- Kim, H., Lee, S., Park, J. H. and Lee, J. G., A model for a simulation-based shipbuilding system in a shipyard manufacturing process, International Journal of Computer Integrated manufacturing, Vol. 18, No. 6 (2005), pp.427-441.
- Murayama, N., Kawata, S. and Koguchi, T., Scene transition net simulation in a distributed environment, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 71, No. 703 (2005), pp.1054-1061.
- McLean, C., Riddick, F. and Tina, Y., An architecture and interfaces for distributed manufacturing simulation, Simulation, Vol. 81, No. 1(2005), pp. 15-32.
- Mitsuyuki, K., Kojima, F., Douba, H., Fukuda, Y. and Arai, E., Simulation to design and improve Kanban system, CIRP J. manufacturing systems, Vol.33 (2004), pp.200-206.
- Nissan Motor Co., A case study of energy consumption per unit of production throughput,
http://www.jsme.or.jp/publish/ronbun/JSME_Manual_20100730.pdf (accessed on 20 August, 2015) (in Japanese).
- Narita, H., Kawamura, K., Norihisa, T., Chin, L., Fujimoto, H. and Hasegawa, T., Development of prediction system of environmental burden for machine tool operation : 1st Report, Proposal of calculation method of environmental burden, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 71, No. 704 (2005), pp.1392-1399.
- Sakuma, T., Hibino, H. and Yamaguchi, M., Manufacturing system simulation to evaluate energy productivity (2nd report, production planning using energy consumption per unit of production throughput), Transactions of the JSME 2012 annual conference (2012), S142015 (in Japanese).
- Touma, S., Omori, S., Kokubo, K. and Tateno, M., Evaluation of environmental burden in eco-friendly machining method using life cycle assessment method, Journal of the Japan Society of Precision Engineering, Vol. 69, No. 6 (2003), pp.825-830 (in Japanese).
- Williams, E. and Celik, H., Analysis of conveyor systems within automotive final assembly, Proceedings of the 1998 conference on Winter simulation (1998), pp.915-920.
- YKK AP Inc., 2014 Environmental activity report, news release, available from
<<http://www.ykkap.co.jp/company/japanese/news/2015/20150811.html>>, (accessed on 20 August, 2015) (in Japanese).