

氏 名	井 山 俊 郎
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 5 0 年 3 月 2 5 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 精密工学専攻（博士課程）
学 位 論 文 題 目	生産ラインの Buffer に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 佐藤 健児
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 佐藤 健児 東北大学教授 松井 正己 東北大学教授 高梨 三郎 東北大学助教授 手島 恒男

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

電気機械，自動車メーカー等における組み立てラインや加工ラインの最適な生産ラインを設計する場合，重要な問題として作業配分問題と work の流れのゆらぎの問題が発生する。前者の問題は生産ラインのバランスロスを扱ったもので，最近では組み合わせ論的な方法等によりラインバランス問題として研究が大いに進歩している。一方後者の問題は生産ラインのシステムロスを扱ったもので，その解決法として Buffer の設置が考えられている。この Buffer を設置するには一般に生産ラインの定常状態の完成 Work 平均出力間隔つまり最終工程の平均 Idle 時間 \bar{T}_N と生産ラインシステムパラメータの関係が明らかにされなくてはならない。しかし，この関係はその複雑な Work の流れの挙動が解析を困難にし，現在までバランス化された種々の生産ラインモデルに対し一般的な立場で十分な研究がなされていない。

従って本研究は一般の多くの工場で存在する直列型生産ラインを対象としバランス化直列型生産ラインのWorkの流れのゆらぎとBuffer設置の関係を一般的な立場で定量的、定性的に明らかにすることを第一に考えた。またBufferのより効率的利用をめざしたBufferの多工程共同利用の基本的効果を得るための解析を第二に考えた。

第2章 生産ラインの数学モデル設計

本研究で対象とする生産ラインは、各工程が作業時間変動を持つラインと作業時間変動と故障の発生を持つラインである。

作業時間変動を持つラインのWorkの流れを明らかにするIdle, Block 時間は一般的な数学モデルで表わすと $[X]^+ = \text{Max}[0, X]$ を用い、

$$\left. \begin{aligned} I_{n+1, i} &= \left[\sum_{j=1}^{i-1} (I_{n, j} + X_{n, j} + B_{n, j}) - \sum_{j=1}^{i-1} (I_{n+1, j} + X_{n+1, j} + B_{n+1, j}) \right] \\ B_{n, i} &= \left[\sum_{j=1}^{i-M_n} (I_{n+1, j} + X_{n+1, j} + B_{n+1, j}) - \sum_{j=1}^{i-1} (I_{n, j} + X_{n, j} + B_{n, j}) - (I_{n, i} + X_{n, i}) \right]^+ \\ I_{1, i} &= B_{N, i} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

($n = 1, 2, \dots, N-1, i = 1, 2, 3, \dots$)

のようになる。ただし、 $I_{n, i}, X_{n, i}, B_{n, i}$ はそれぞれ工程nにおけるi番目のWork作業着手直前のIdle時間, i番目のWork作業時間, i番目のWork作業完了直後のBlock時間であり、N, M_n はライン工程数、工程nとn+1間のBuffer容量である。また工程番号はWorkの流れていく順に1, 2, ..., NとしWorkの番号は各工程ごとに独立で工程1のi番目のWorkは工程nでi+n-1番目のWorkである。一方作業時間変動と故障の発生を持つラインのIdle, Block 時間は、新たに滞在時間 $Y_{n, i}$ を定義し(1)の作業時間の代りに滞在時間を用いて定式化される。滞在時間は

$$f^*(y) = (1-\alpha) \cdot f(y) + \alpha \cdot f * r(y) \quad (2)$$

なる確率密度関数(p. d. f.) $f^*(y)$ で表わされるものである。ただし、 $f(\cdot), r(\cdot), \alpha$ はそれぞれ各工程の作業時間 p. d. f., 修理時間 p. d. f., 故障率で $f * r(\cdot)$ は $f(\cdot)$ と $r(\cdot)$ のたたみこみ関数である。

第3章 シミュレーションの方法

一般的な直列型生産ラインモデルの汎用シミュレーションプログラムが新たに設計され、このプログラムによると本研究で扱われた種々のモデルに対しサンプル数 S_N が500個以上で初期条

件の影響がほとんどない。SN が 2500 個以上で定常状態の \bar{I}_N が推定可能となった。また工程数 N が 2 の場合、種々のサンプル数による \bar{I}_N 推定の精度を示す信頼区間 d' は、

$$d' = (\sigma / \sqrt{SN \cdot S_n}) \cdot Z_{d/2} \quad (d = 5\%) \quad (3)$$

で近似的に表わされることがわかった。ただし、 σ は作業時間、滞在時間標準偏差、SN はシミュレーションランの繰り返し数、 $S_n \cdot S_n$ は延べサンプル数、 $Z_{d/2}$ は Z 統計量である。

本研究で明らかにされる \bar{I}_N の近似推定の精度は $S_n \cdot S_n$ が 500・6 個の推定精度を下限とし、 \bar{I}_N の真値の代用として $S_n \cdot S_n$ が 5000・6 個の \bar{I}_N 推定値を用いた。

第 4 章 2 工程直列型生産ラインモデル

2 工程直列型生産ラインにおいて各工程が作業時間変動を持つ場合、式(1)を変形し、

$$\left. \begin{aligned} I_{2,i} &= [X_{1,i-1} - X_{2,i-1}]^+ \\ &= [X_{1,i-1} - X_{2,i-1} - [Y_{i-2}]^+]^+ \end{aligned} \right\} \begin{aligned} M &= 0 \\ M &\geq 1 \end{aligned} \quad (4)$$

が導かれる。ただし、 Y_{i-2} は工程 2, 1 それぞれの $i-2$ 番目の Work の出力時刻の差を M は Buffer 容量を表わしている。ここで Y_{i-2} の定常状態の p. d. f. を近似的に求めバランス化ラインであることを考慮し \bar{I}_N は、

$$\left. \begin{aligned} \bar{I}_N &= \{ P_1^2 + \int_0^\infty z_2 \cdot \int_0^\infty \int_{y_2}^\infty h_M(x) dx \cdot \int_0^\infty f(x_2) \cdot f(x_2 + y_2 + z_2) dx_2 dy_2 dz_2 \} / (P_1 + P_2) \\ P_1 &= \int_{-\infty}^0 \int_0^\infty \int_{x_2 - y_1}^\infty f(x_2) \cdot f(x_1) dx_1 dx_2 dy_1 \\ P_2 &= \int_0^\infty \int_{y_2}^\infty h_M(x) dx dy_2 \end{aligned} \right\} (5)$$

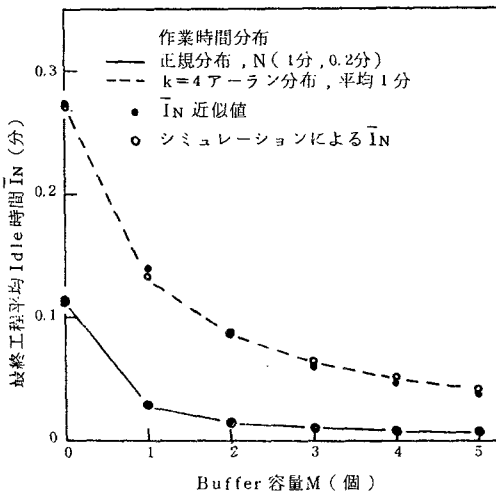


図 1 \bar{I}_N の近似値

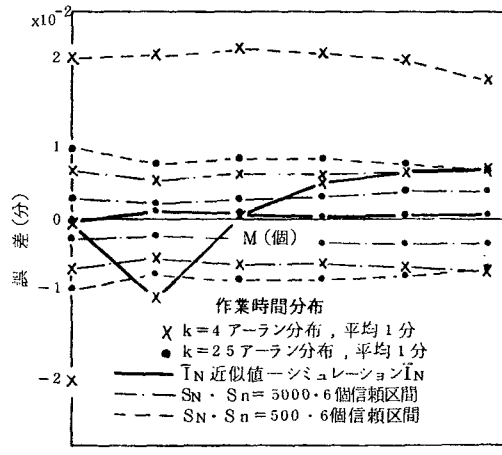


図 2 \bar{I}_N の精度

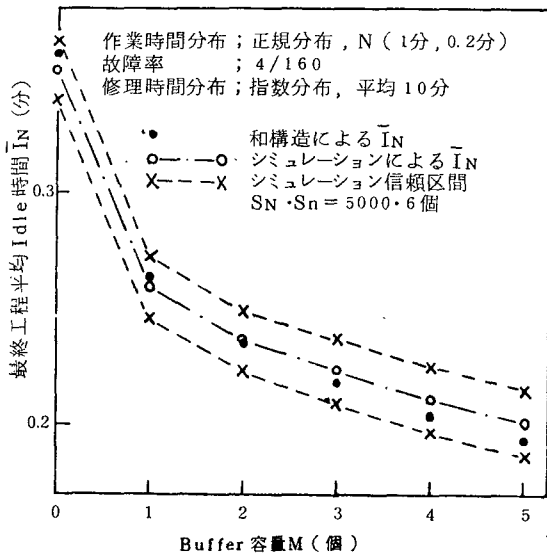


図3 \bar{I}_N の精度

\bar{I}_N 近似値は平均作業時間 / 平均修理時間あるいは故障率・平均修理時間が小さいほど、

$$\bar{I}_N \approx \bar{I}_N^{\text{作}} + \bar{I}_N^{\text{故}} \quad (6)$$

なる和構造で推定されることが明らかにされた。ただし、 $\bar{I}_N^{\text{作}}$ 、 $\bar{I}_N^{\text{故}}$ は作業時間変動と故障の発生を持つモデルに対応した作業時間変動だけを持つモデル、故障の発生だけを持つモデルの \bar{I}_N である。従ってBuzacott による $\bar{I}_N^{\text{故}}$ と式(5)による $\bar{I}_N^{\text{作}}$ を用い \bar{I}_N が近似的に得られる。この結果の例は図3に示され、十分シミュレーション精度に対応していることが示された。

第5章 多工程直列型生産ラインモデル

各工程が作業時間変動を持つ場合、工程数 N が $2 \leq N \leq 5$ の直列型生産ラインにおいて \bar{I}_N と生産ラインシステムパラメータの関係は次のようである。

式(1)から作業時間確率変数 X が $\eta \cdot X$ に変化した場合、 \bar{I}_N / m_X 、 \bar{I}_N / σ_X は一定で工程数 N 、各工程間Buffer容量 M 、作業時間変動係数 $\rho = \sigma_X / m_X$ 、作業時間分布形状を表わすパラメータ X_c で求めることができる。また M と m_X の関係は Idle、Block時間の発生過程を吸収壁を持つランダムウォークとして考え σ_X 、 $m_X \cdot M$ が一定なる任意の m_X 、 M の組み合わせで \bar{I}_N が近似的に一定となることが示された。従って以上のことから \bar{I}_N は、

$$\bar{I}_N \approx g(m_X \cdot M / \sigma_X, N, X_c) \cdot \sigma_X \quad (7)$$

なるパラメータ関数で近似的に得られる。また関数 $g(\cdot)$ の N に対する影響をシミュレーションで調べることにより、

$$\left. \begin{aligned} \bar{I}_N &\approx \delta(N) \cdot g(m_X \cdot M / \sigma_X, 2, X_c) \cdot \sigma_X \\ \delta(N) &= \bar{I}_N |_{M=0} / \bar{I}_2 |_{M=0} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

となる。ただし、 $hm(\cdot)$ は作業時間 p.d.f. の M 回のたたみこみ関数である。また作業時間分布が正規分布の場合、中心極限定理を応用し k アーラン分布で近似的に \bar{I}_N が得られる。以上の結果の例を図1にシミュレーション精度との関係を図2に示した。この結果近似的に得られる \bar{I}_N はシミュレーション精度に十分対応していることが示された。一方各工程が作業時間変動と故障の発生を持つ場合 \bar{I}_N は式(5)の作業時間 p.d.f. の代わりに滞在時間 p.d.f. を用いることで近似的に得られこの近似値はシミュレーション精度に十分対応していることが示された。またこの場合、

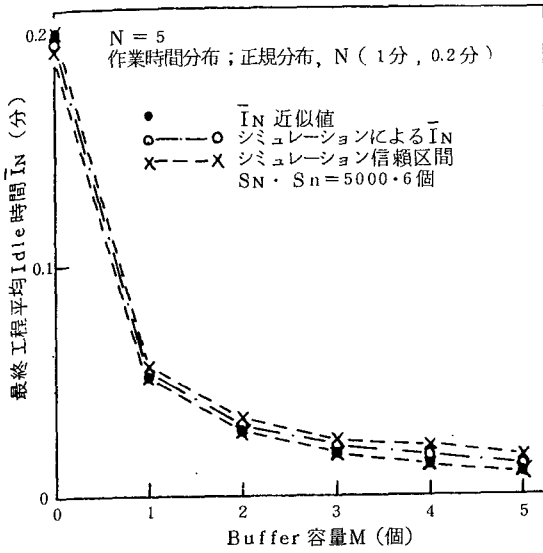


図4 \bar{I}_N の精度

の成立が示された。

以上の結果から $3 \leq N \leq 5$ の多工程直列型生産ラインにおける \bar{I}_N は $\delta(N)$ を得ることで可能となった。この $\delta(N)$ をここでは、

$$X_{1i} + B_{1i} \leq \max[X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{Ni}, i] \quad (9)$$

なる不等式を応用して近似的に推定した。この結果を用いて得られる \bar{I}_N は図4のようであり、シミュレーション精度に対応していることが示された。一方工程数が $3 \leq N \leq 5$ の多工程直列型生産ラインにおいて各工程が作業時間変動と故障の発生を持つ場合、式(6)の成立が示された。従って \bar{I}_N は $\bar{I}_N^{\text{作}}$ が式(8)で近似的に得られるため、 $\bar{I}_N^{\text{故}}$ を求めることで推定で

きる。 $\bar{I}_N^{\text{故}}$ はシミュレーション結果のパラメータ分析から、

$$\left. \begin{aligned} Q(\bar{I}_N^{\text{故}}) &\approx \delta^*(N) \cdot Q(\bar{I}_2^{\text{故}}) \\ Q(\bar{I}_N^{\text{故}}) &= \bar{I}_N^{\text{故}} / (\bar{I}_N^{\text{故}} + \alpha / \mu) \\ \delta^*(N) &= Q(\bar{I}_N^{\text{故}}) |_{M=0} / Q(\bar{I}_2^{\text{故}}) |_{M=0} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

を用いて推定されることが示された。ただし、 α 、 μ は各工程の故障率、修復率である。以上の $\bar{I}_N^{\text{作}}$ 、 $\bar{I}_N^{\text{故}}$ を用いて \bar{I}_N が近似的に得られ、和構造による \bar{I}_N はシミュレーション精度に対応していることが示された。

第6章 Buffer容量の配分

各工程間に配分されるBufferの総容量が制約されている場合、種々のBuffer配分が \bar{I}_N に対しどのような影響を持つかWorkの流れに対するBufferの影響とシミュレーション結果から調べられた。

まず多工程直列型生産ラインにおいて \bar{I}_N に重要な影響を与える因子は(i)各工程間に配分される最小のBuffer容量、(ii)中央の工程間に配分されるBuffer容量であり(i)、(ii)の順に大きな影響を持つ。さらに \bar{I}_N を最小にするBuffer配分は各工程間に等配分あるいは総Buffer容量が大きい時Bowl-phenomenaに似たWorkの流れを発生させるBuffer配分で得られた。

第7章 Bufferの共同利用に対する基礎的解析

Buffer内のWork保有数は0からfullの間で変化するためBufferを多数の生産ラインで

共同利用することは、Buffer の利用率を高め完成 Work 生産速度が高まると考えられる。ここで Buffer 共同利用の基本的効果を得るため、各工程が作業率 λ_1, λ_2 で Buffer 容量 M_s を持つ 2 工程直列型生産ラインが S 個互いに Buffer を共同利用する状況を考えた。このとき Buffer 共同利用の効果はマルコフモデルを用いて解析でき、各直列型生産ラインの平均の \bar{I}_N つまり $\bar{I}_{並}$ は優先順位に関係なく求められる。この $\bar{I}_{並}$ を得るため各直列型生産ラインに要求される仮想的 Buffer 容量 $M_{s假}$ は $\lambda_1 = \lambda_2$ の場合、

$$M_{s假} = \left[\{ 2 \cdot (S-1)! / S^{S-1} \} \cdot \sum_{j=0}^{S-1} S^j / j! - 2 \right] + S \cdot M_s \quad (11)$$

となる。この結果 Buffer の共同利用による効果が非常に大きいことが示された。

第 8 章 結 論

本研究で得られた主な結論は以下のとおりである。

まず一般的直列型生産ラインに対する数学モデルを示し、その汎用シミュレーションプログラムを設計した。さらに工程数 N 、各工程間 Buffer 容量 M が $2 \leq N \leq 5$ 、 $0 \leq M \leq 5$ なるバランス化直列型生産ラインに対し \bar{I}_N の定量化を近似的に求める方法を示し、システムパラメータの \bar{I}_N に対する影響を示した。また Buffer の共同利用に対する基本的効果を解析的に求めた。

審査結果の要旨

工場の生産ラインを設計することは、生産工学上重要な問題であり、また最も困難な事項である。本論文は生産ラインを設計する場合、作業の「ゆらぎ」を吸収するBufferを設置するときの効果を明らかにしたものであり、Bufferによる各種システム・パラメータの影響について、主としてシミュレーション手法を用いて検討したものである。

第1章は緒論で、生産ラインの能率を表わす最終工程の平均Idle時間(以下単に平均Idle時間という)の推定法についてのこれまでの研究概要と、この研究の目的などについて述べている。

第2章では、基本となる直列型生産ラインのモデルについて、Idle時間・Block時間を定義し、Buffer容量によってこれらの「むだ時間」がどのように減少するかについて解析し、また各工程での滞在時間の式を求めている。

第3章は作業時間変動と故障の発生を持つモデルについて、平均Idle時間を求めるシミュレーション・プログラムを示し、それを実行する場合の各種の注意について述べている。

第4章は多工程生産ラインの基礎となる2工程直列型生産ラインについて平均Idle時間を求め、作業時間変動だけを持つモデルと故障発生だけを持つモデルの和構造としてそれが表わされることをシミュレーション手法により推定している。

第5章は多工程直列型生産ラインについて、工程数2～5の場合のシミュレーションを行い、平均Idle時間に及ぼす各種システム・パラメータの影響を求め、上記の和構造の精度を求めている。これは著者の最も苦心した部分で、これにより生産ラインのBufferの設計に有用な資料が得られている。

第6章は各工程のBufferの総容量が制約されているとき、Buffer配分により平均Idle時間がどのように変るかを調べている。

第7章はBufferの共同利用についての解析である。共同利用により平均Idle時間が大巾に減少できることを確かめている。

第8章は以上の総括と結論である。

以上要するに、本論文は生産ラインにおけるBufferの特性を解明し、Bufferを用いて最適な生産ラインを設計するための諸条件を明らかにしたものである。これは生産工学の進展に寄与するのみならず、工場の生産技術に対して有用な基礎資料を与えたものである。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。