報 文

1 方向巡回の糸故障修理システムとその管理基準

(第2報) 管理基準と繰糸工程への応用

東京大学農学部 寿 国 梁 (会員)

One-way Rounding Repair System of Reeling Thread Troubles and its Control Standard

Part 2 : Control Standard and Application to Silk Reeling Process

Guoliang Shou

Faculty of Agriculture, University of Tokyo

2-24-16, Naka-machi, Koganei, Tokyo

Abstract

The purpose of this study is to analyze the statistical properties of the one-way rounding repair system of reeling thread troubles and set up the control standard of the system. With these results, we can optimize the number of machines assigned to operator and design the one-way rounding repair system more appropriately. In this paper, experiments of simulations were carried out to validate and simplify the theoretical results, and the theoretical fundamentals to optimize the one-way rounding repair system were obtained.

The main results in the part 2 are summarized as follows :

- (1) The statistical property of the waiting time for the repair of the reeling thread troubles became clear.
- (2) The control standard of the waiting time for the repair of the reeling thread troubles was obtained.
- (3) The work rate of repairing robot and the operation rate of machine were obtained.
- (4) The control standard of the work rate of repairing robot, the operation rate of machine and the number of reeling thread troubles were discussed.
- (5) The application of the theory of the one-way rounding repair system of reeling thread troubles to silk reeling process was attempted.

(Received January 25, 1989)

摘 要

目的 1 方向巡回の糸故障修理システムの統計的な性質を解析し、システムの管理基準を設立する。これを通じて、作業員の受持ち機械台数の最適化をはかり、1 方向巡回の修理システムをより適当に設計することができる。本報は、理論的な展開をシミュレーション実験で検証し、その結論を単純化させ、1 方向巡回の修理システムを最適化するための理論的な基礎を与えた。

成果 第2報における主な結果を以下に示す。

- (1) 糸故障修理の待ち時間の統計的性質が解明された。
- (2) 糸故障修理の待ち時間の管理基準が得られた。
- (3) 修理ロボットの就業率と機械の稼働率が求められた。
- (4) 修理ロボットの就業率と機械の稼働率及び故障数の管理基準を検討した。
- (5) 1 方向巡回の糸故障修理システムの理論の繰糸工程への応用を試みた。

(平成元年1月25日受理)

1. 緒 言

繊維工場における生産システムの効率をより向上させるために、糸切れなどの糸故障を少なくし、あ

るいは早期発見し、迅速に修理しなければならない。しかし、効率を追求することは故障管理に必要とする費用の上昇をもたらしかねないので、人件費などのコストを考慮し、適正な受持ち台数を設定す

る必要がある。

前報⁷⁾では、繊維工場（製糸工場、織布工場など）における1方向に巡回する糸故障修理システムを考え、数理統計学的手法を用いて解析を行った。その結果、 N 台の機械における1方向巡回の糸故障修理システムに対して、修理ロボットの修理時間は平均値 λ^{-1} を持つ指数分布に、1台の機械が連続稼働する時間間隔は平均値 μ^{-1} を持つ指数分布に従うとき、次のようなことが知らされた。

1) 1巡回間隔で修理ロボットによって修理された故障機械台数 n は近似的に次式の2項分布に従う。

$$P(n) = {}_N C_n p^n \cdot (1-p)^{N-n} \quad (1)$$

ここに、 p は1巡回に1台の機械が故障する確率で、次の関係式を満足する。

$$p = 1 - \exp(-NT\mu) \left(1 - p + \frac{p\lambda}{\lambda + \mu}\right)^N \quad (2)$$

ここに、 T は修理ロボットが隣接する機械間の移動に必要とする時間を表す。

2) 巡回間隔 x の密度関数 $f(x)$ は、

$$f(x) = \begin{cases} \sum_{n=1}^N \frac{\lambda^n (x-NT)^{n-1}}{(n-1)!} \exp(-\lambda(x-NT)) {}_N C_n p^n \cdot (1-p)^{N-n} & x > NT \\ (1-p)^N & x = NT \end{cases} \quad (3)$$

で与えられる。そのラプラス変換 $\mathcal{L}\{f(x)\}$ は、

$$\mathcal{L}\{f(x)\} = (1-p + \frac{p\lambda}{\lambda + s})^N \cdot \exp(-NTs) \quad (4)$$

で与えられる。ここに、 s はラプラス変換の変数を表す。

3) 巡回間隔 x の平均値 $E(x)$ と分散 $V(x)$ はそれぞれ、

$$E(x) = NT + \frac{Np}{\lambda} \quad (5)$$

$$V(x) = \frac{Np(2-p)}{\lambda^2} \quad (6)$$

で与えられる。

4) N 台の機械における1方向巡回の糸故障修理システムをシミュレートするプログラムを開発し、それによって、(1)~(6)の妥当性を確認した。

本報では、これらの結果をもとにして、まず、1

方向巡回の糸故障修理システムにおける故障修理の待ち時間の分布特性を解明し、故障修理の待ち時間を目標とする管理基準を与える。次に、修理ロボットの就業率と機械の稼働率を求め、就業率と稼働率及び故障数を目標とする管理基準を検討する。最後に、繰糸工程の接緒作業（何粒かの繭の糸を合わせて繰糸をするとき、その中のある繭糸が切断した場合などに、新たに別の繭を補充するためにその繭の糸口をつけること）を対象として、1方向巡回の接緒システムへの応用を試みる。

2. 糸故障修理の待ち時間 w の分布特性

図1(a)に示しているように糸故障が巡回間隔 x で発生したとする（前報の1巡回に1台の機械が故障する確率 p を計算すると同様に、図1(b)のような2巡回間隔で連続に故障するケースは無視できると仮定する）。このとき、修理ロボットは、巡回をし

Fig. 1 Illustration of calculation of the waiting time for the repair of the reeling thread troubles.

ていて、すぐに修理しはじめるとは限らないので、修理待ち時間が生じることになる。糸故障が発生したという条件のもとで、糸故障修理の待ち時間 w は $x - \pi$ として求められる（図1(a)）。この条件付き確率変数の統計的特性は前報で検討した確率 p の求め方とほぼ同様な考えで求めることができるが、ここでは、より簡単なアプローチを考える。

図1(a)のように、巡回が次々に行えば、1台の機械に対して、巡回間隔の数値は1つの点過程を構成する。もし、巡回間隔数値は互いに独立であれば、1つの更新過程を構成することになる。ここで、更

新点はその機械を巡視し始める時点で、更新間隔は巡回間隔である。従って、糸故障修理の待ち時間 w は更新過程の前方再帰時間と考えてもよい。更新理論^{1,2)}から糸故障修理の待ち時間の密度関数 $g(w)$ は、

$$g(w) = \frac{\int_0^\infty f(x) dx}{E(x)} \quad (7)$$

で与えられる。ここに、 $f(x)$ と $E(x)$ はそれぞれ、(3)と(5)式に示されている巡回間隔の密度関数とその平均値を表す。(7)式から、糸故障修理の待ち時間の密度関数 $g(w)$ のラプラス変換 $\mathcal{L}\{g(w)\}$ は、

$$\mathcal{L}\{g(w)\} = \frac{1 - \mathcal{L}\{f(x)\}}{s \cdot E(x)} \quad (8)$$

で与えられる。

これを利用して、糸故障修理の待ち時間の平均値 $E(w)$ と分散 $V(w)$ は求められる。それぞれ、

$$E(w) = \frac{E(x)^2 + V(x)}{2E(x)} \quad (9)$$

$$V(w) = M_3/3E(x) - E(w)^2 \quad (10)$$

で示される。ここに、 $E(x)$ 、 $V(x)$ と M_3 はそれぞれ巡回間隔の平均値、分散と3次モーメントを表す。

これらの結果は任意の分布に従う巡回間隔をもとにして得られたもので、以下のことが考えられる。

1) (9)式からわかるように、糸故障修理の待ち時間の平均値は巡回間隔の平均値と分散とだけ関係し、それらの増加とともに増加する。巡回間隔の平均値を一定にすると、その分散を小さくすることによって、待ち時間の平均値を小さくすることができ、分散がゼロのとき、待ち時間の平均値が最小値(巡回間隔の平均値の半分)を取る。言い換えれば、巡回間隔の平均値が同じである場合、糸故障待ち時間の平均値を最小にするために、定間隔で巡回すればよい。本論文で検討している巡回システムについて、故障修理の時間がゼロの場合は定間隔巡回になる。しかし、修理時間が無視できない場合は、定間隔巡回ができなくなる。

2) (10)式からわかるように、糸故障修理の待ち時間の分散は巡回間隔分布の3次までのモーメントによって決定される。

修理時間が平均値 λ^{-1} を持つ指数分布に従うと仮定すれば、(7)、(8)式はそれぞれ、

$$g(w) = \begin{cases} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^n \frac{\{\lambda(w-NT)\}^{n-1}}{(n-i)!} \exp\{-\lambda(w-NT)\} \\ \frac{P(n)}{NT/Np/\lambda} & w > NT \\ 1/(NT+Np/\lambda) & w \leq NT \end{cases} \quad (11)$$

$$\mathcal{L}\{g(w)\} = \frac{1 - \mathcal{L}\{f(x)\}}{s \cdot N(T+p/\lambda)} \quad (12)$$

になる。

糸故障の待ち時間の平均値 $E(w)$ と分散 $V(w)$ は(11)、(12)式から、それぞれ、

$$E(w) = \frac{N(T\lambda+p)^2+p-p}{2\lambda(T\lambda+p)} \quad (13)$$

$$V(w) = -2p\lambda^{-3}(-1+p-p^2/3)/(T+p/\lambda) + Np(2-p)/\lambda^2 + (NT+Np/\lambda)^2/3 - E(w)^2 \quad (14)$$

となる。

これらの結果を成り立たせるために、機械を巡回する間隔の数値は独立でなければならない。1方向巡回の糸故障修理システムの場合では、厳密に言えばこの独立性を持っていない。しかし、故障がそれほど頻繁に発生しなければ、独立とみなしても差し支えないことが推測される。そこで、これらの近似はどの程度の誤差を生じるために、シミュレーション実験を行って、理論と実測値との結果を比較した。

図2、図3の実線は(13)、(14)式による理論値(p は(2)式によって計算される)で、印は理論値と同様な条件(同様なパラメータ N 、 μ 、 λ 、 T 、又、巡回回数 M はすべて10万回とする)を与えたときの前報の2節に示したアルゴリズムのシミュレーション実験値である。

図2(a)、図3(a)は管理する機械台数による待ち時間の平均値と標準偏差の変動を示す。機械台数の増加につれて、平均値と標準偏差はほぼ線形的に増加する。

図2(b)、図3(b)は機械の平均連続稼働時間による待ち時間の平均値と標準偏差の変動を示す。ほとんど平均連続稼働時間によらず、一定の値を取っている。

図2(c)、図3(b)は故障の平均修理時間による待ち時間の平均値と標準偏差の変動を示す。平均修理時間の増加につれて、平均値と標準偏差は次第に

Fig. 2 Comparison of the experimental results by simulations with the calculated results by expression (13).

(a) Mean of the waiting time versus N (the number of machines).

($\lambda = 1$; $T = 2$; + : $\mu^{-1} = 500$, Δ : $\mu^{-1} = 700$, ∇ : $\mu^{-1} = 900$)

(b) Mean of the waiting time versus μ^{-1} , (mean of continually working time).

($\lambda = 1$; $N = 10$; + : $T = 1$, Δ : $T = 3$, ∇ : $T = 5$)

(c) Mean of the waiting time versus λ^{-1} , (mean of repairing time).

($\mu = .001$; $T = 2$; + : $N = 10$, Δ : $N = 15$, ∇ : $N = 20$)

(d) Mean of the waiting time versus T (moving time to next machine).

($\mu = .001$; $N = 10$; + : $\lambda^{-1} = 1$, Δ : $\lambda^{-1} = 3$, ∇ : $\lambda^{-1} = 5$)

Fig. 3 Comparison of the experimental results by simulations with the calculated results by expression (14).

(a) Standard deviation of the waiting time versus N (the number of machines).

(condition of simulation is same with Fig. 2(a))

(b) Standard deviation of the waiting time versus μ^{-1} , (mean of Continually working time).

(condition of simulation is same with Fig. 2(b))

(c) Standard deviation of the waiting time versus λ^{-1} , (mean of repairing time).

(condition of simulation is same with Fig. 2(c))

(d) Standard Deviation of the waiting time versus T (moving time to next machine).

(condition of simulation is same with Fig. 2(d))

大きくなる。

図2(d), 図3(d)は隣接する機械間の移動時間による待ち時間の平均値と標準偏差の変動を示す。はば, 移動時間と比例して増加する。

1台の機械が1巡回で故障する確率 p は小さいとき, 理論値とシミュレーション実験値とはよく一致しているが, p が大きいとき, 巡回間隔の標準偏差を検討したときと同様に, システムにおける各機械の稼働状況は独立でなくなり, 巡回間隔の間の相関が強くなることで, ずれが大きくなる傾向にある。

図4は糸故障修理の待ち時間の分布を示すもので, ヒストグラムは前報の2節で与えたアルゴリズムのシミュレーション実験値 ($\mu=0.001, \lambda=0.1, T=2, N=10$) を, 実線は実験値と同様な条件を与えたときの(11)式による理論値を示したものである (p は(2)式によって計算される)。よく一致していることが知られた。

Fig. 4 Frequency distribution of the waiting time for the repair of the reeling thread troubles. Histogram: Experimental values by simulations. Curved line: Calculated value by expression(11)

3. 故障修理の待ち時間を管理対象とする場合の管理規準

故障修理の待ち時間が長くなると, 生産の能率が悪化し, 場合によって製品の品質に重大な影響を与える(例えば, 製糸工場では, 糸むらの欠点はしばしば生糸品質の格を下げる原因となっている)。しかし, 待ち時間をなくすためには, 繊維機械の台ごとに修理ロボットを設置しなければならないので, 台当たりの故障がめったに発生しない繊維工場では, このような設置方法は修理ロボットの稼働率が低すぎて現実的なことではない。

a) 糸故障修理の待ち時間の平均値を L 以下にする

という条件のもとで, 修理ロボットが受持ちできる最大機械台数:

修理時間が指数分布に従うとき, 図2は糸故障修理待ち時間の平均値と機械修理の受持ち台数, 機械の平均連続稼働時間, 平均糸故障の修理時間及び隣接する機械間の移動時間との関係を示している。機械の平均連続稼働時間, 平均糸故障の修理時間を減らしても, それほど効果がみられないが, 修理を受持つ台数と隣接する機械間の移動時間を減らせば, 待ち時間が著しく小さくなる。

一般に, T, λ, μ は修理ロボットと機械の固有のもので, それらの調整は困難である。(13)式から, パラメータ T, λ, μ が一定のとき, 次の(15)式を満足する(糸故障の待ち時間の平均値を L 以下にする) N を見つければ, 最大の受持ち機械台数が決定される。

$$\frac{N(T\lambda + p)^2 + p(2 - p)}{2\lambda(T\lambda + p)} \leq L \quad (15)$$

図5はこの決定方法の一例で, 1台修理ロボットの管理できる機械の受持ち台数の最大値を示している。最大値ははば, L の増加とともに, 線形的に増加する。その計算アルゴリズムは次のようである (p は(2)式によって計算される)。

Fig. 5 Upper bound of the number of machines against the mean of the waiting time.

— : $T=2, \lambda=.1, \mu=.001$
 : $T=.1, \lambda=.2, \mu=.001$
 : $T=1, \lambda=.1, \mu=.001$

- 1) T, λ, μ と N の初期値を与え, flag 0 と flag 1 をゼロにする。
- 2) 積 $\text{flag } 0 \times \text{flag } 1$ が -1 でなければ, flag 1 = flag 0 をして, ステップ3)へジャンプする。
 -1 であれば, ステップ6)へジャンプする。
- 3) p を計算し, N が(15)式を満たしているのかを調べる。
- 4) 満たしているとすれば, N に1をたして,

flag 0 を 1 にセットする。そうでなければ, N から 1 をひいて, flag 0 を -1 にセットする。

5) ステップ 2) ヘジャンプする。

6) flag 0 が -1 であれば, N を, flag 0 が 1 であれば, $N-1$ を最大の受持ちできる機械の台数とする。

b) 糸故障修理の待ち時間が z より長い場合の確率を α 以下にするという条件のもとで, 修理ロボットの受持ちできる最大機械台数:

上の平均値による管理は比較的わかりやすいが, 分散が大きい場合, 糸故障修理の待ち時間の平均値だけをおさめても, その平均値以上に待たされることがしばしば発生して, 思わぬ結果になってしまうことがある。このようなことを防ぐために, よく用いられるのは分布関数を利用する方法で, z 以上に待たされる確率 (危険率ともいう) を α 以下にすることによって, 受持ちのできる最大の機械台数を決定する。

(7)式から, 確率 $1-\alpha$ 以上で, 故障修理の待ち時間を z 以下に管理するために, 次の不等式を満足すればよい。

$$\text{Prob}\{w \leq z\} > 1-\alpha \quad (16)$$

修理時間が指数分布に従うとき, z と α の上限との関係を図 6 に示す。明らかに, z が $N \times T$ 以下の時, α が直線的に急速に減少し, $N \times T$ 以上となると, α が指数的に緩やかに減少する。

この場合, 管理規準(16)式は次のようになる。

$z \leq NT$ のとき,

$$z > N(1-\alpha)(T+p/\lambda) \quad (17)$$

$z > NT$ のとき,

$$\frac{T\lambda}{T\lambda+p} + \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^n \left\{ 1 - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\lambda(z-NT))^{n-i-1}}{(n-i-k)!} \right.$$

$$\left. \exp(-\lambda(z-NT)) \right\} \cdot \frac{P(n)}{\lambda E(x)} > 1-\alpha \quad (18)$$

パラメータ T, λ, μ が与えられたとき, 待ち時間が z 以上になる確率を α 以下にする最大の受持ち台数 N は上の不等式から求められる。

この不等式を満足する最大の N を求めるアルゴリズムはほぼ a) と同様である。ただし, ステップ 3) の判断規準は(17), (18)式である。

例として, 図 7 は α がそれぞれ, 0.01, 0.03, 0.05 の時の最大の N を示している。 N の最大値がほぼ, 待ち時間と正比例しているが, 明らかに, 一定の z に対しても, 待ち時間が z を越える確率 α が大きくなれば, N の最大値も大きくなる。これは, 平均値

Fig. 6 Curve of the waiting time versus α (the probability that make the waiting time longer than z).

Fig. 7 Upper bound of the number of machines against the waiting time.

(— : $\alpha = .01$, : $\alpha = .03$, : $\alpha = .05$)

(a) $T = 1, \lambda = .2, \mu = .001$

(b) $T = 2, \lambda = .1, \mu = .001$

による管理の方法と異なるところである。

4. 修理ロボットの就業率 κ と機械の稼働率 ξ

修理ロボットが巡回しながら糸故障を修理する。ここで、全部の巡回時間の中での糸故障を修理するための時間の割合を修理ロボットの就業率と呼ぶ。修理ロボットが m 巡回をし、又、第 i ($i=1, 2, \dots, m$) 巡回で n_i 個の糸故障を修理したとすると、修理ロボットの就業率 κ は、

$$\kappa = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} \tau_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_i}$$

で与えられる。ここに、 τ_{ij} は第 i 巡回での第 j 個糸故障の修理時間を、 x_i は第 i 回の巡回間隔時間を表す。

巡回回数 m と修理した糸故障の数が十分大きくなると、 $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} \tau_{ij}/m$ と $\sum_{i=1}^m x_i/m$ はそれぞれ、1 巡回での修理時間の平均値と巡回間隔の平均値に近付くことがわかる。従って、(5)式の結果を使えば、

$$\kappa = \frac{p}{T\lambda + p} \quad (19)$$

が得られる。

修理ロボットの移動速度は一定の時、就業率が高いことは1巡回に故障数が多く修理時間が長いことを意味している。繊維工場における1方向巡回のシステムに対しては、修理ロボットの移動速度が有限で故障も少ないので、就業率は比較的低い。

図8 (a) は κ と N 及び μ との関係を示している。明らかに、 N と μ の増加とともに、1巡回での故障数が多くなり、就業率 κ が高くなる傾向にある。

図8 (b) は κ と λ 及び T との関係を示している。 λ と T の減少とともに、1巡回での故障数が多発し、移動時間が少なくなるので、 κ は低くなる。

繊維工場において、修理ロボットの就業率はそれほど重要なものではないので、普通、管理は行わないが、もし、ロボットがたいへん高価で、修理待ち時間と故障数及び稼働率などは問題としない場合は、次のような基準で管理することができる。

$$\frac{p}{T\lambda + p} \geq \nu$$

ここに、 ν は要求される最低就業率である。

Fig. 8 Illustration of the relationship of κ (the work rate of repairing robot) to N, λ^{-1} .
(a) κ to N ($T=1$; $\lambda=1$; $\dots \dots \mu^{-1}=500$,
 $\dots \dots \mu^{-1}=700$, $\dots \dots \mu^{-1}=900$)
(b) κ to λ^{-1} ($N=30$; $\mu=.001$; $\dots \dots T=1$, $\dots \dots T=5$, $\dots \dots T=9$)

同様に、修理ロボットが移動している時間の割合 η は、

$$\eta = 1 - \kappa$$

で与えられる。

一方、1台の機械の稼働状況を調べてみると、稼働している期間、糸故障修理待ち時間の期間と修理を受ける期間にわかれ、又、その順番に繰返していることが知られる。従って、巡回回数が十分に大きいとき、システムの稼働率 ξ は、

$$\xi = \frac{\text{稼働時間}}{\text{稼働時間} + \text{修理待ち時間} + \text{修理時間}} = \frac{\lambda}{\lambda \{1 + \mu E(w)\} + \mu} \quad (20)$$

で与えられる。ここに、 $E(w)$ は糸故障修理の待ち時間の平均値で、(13)式に示している。

図9 (a) は ξ と N 及び λ との関係を示している。 N と λ の増加によって、修理時間と修理待ち時間が長くなり、 ξ は小さくなる。従って、受持ち台数 N は多くなりすぎると、機械の生産効率はかなり低くなり、1台のロボットによる巡回管理は適当でなくなってしまう。図9 (b) は ξ と μ 及び T との関係

Fig. 9 Illustration of the relationship of ζ (the operation rate) to N, μ^{-1} .

- (a) ζ to N ($\mu^{-1}=500$; $T=1$; —: $\lambda=1$,
.....: $\lambda^{-1}=5$,: $\lambda^{-1}=9$)
(b) ζ to μ^{-1} ($N=10$; $\lambda=1$; —: $T=1$,
.....: $T=3$,: $T=5$)

を示している。移動時間 T が短くなると、修理待ち時間が短くなり、 μ が小さくなると、稼働時間が長くなり、機械もめったに故障しないので、 ζ は大きくなる。

稼働率の管理基準として、

$$\frac{\lambda}{\lambda \{1 + \mu E(w)\} + \mu} > \delta \quad (21)$$

が与えられる。繊維工場では、普通、平均稼働時間が修理時間と比べて比較的大きく、 ζ は 1 に近い値を取っている。計算のアルゴリズムは 3 節 a) で与えられたものと同様である。ただし、ステップ 3) の判断基準は上の式である。

5. 糸故障数とその管理

糸故障が発生するたびに、欠点が生じ、欠点がある限界を越えると、品質に大きな影響を与える場合がある。このとき、糸故障を管理し、その限界以下におさめなければならない。

a) 1 巡回間隔での故障数とその管理：

1 巡回間隔での故障数の数分布特性は前報の 3 節で明らかにしたので、その結果を利用して、糸故障数を管理することができる。

平均値による管理：

1 巡回間隔での糸故障数の平均値は $N \times p$ で与えられるので、管理する機械の台数 N が一定の場合では、1 巡回間隔での糸故障数の平均値は 1 巡回間隔で 1 台の機械が故障する確率 p (p は (2) 式のように、 T, λ, μ, N の関数である) に完全に決定される。

機械台数 N が一定の時、修理時間の平均値、連続稼働時間の平均値及び隣接する機械間の移動時間による変動傾向は p の変動傾向と一致している。

糸故障修理の平均待ち時間の管理と同様に、1 巡回間隔での糸故障数の平均値を ε 以下にするという条件のもとで、修理ロボットの受持ちできる機械台数の最大値は次の式を満たす最大の N で与えられる。

$$Np < \varepsilon \quad (22)$$

その一例は、図 10 に示す。計算のアルゴリズムは 3 節 a) で与えられたものと同様である。ただし、ステップ 3) の判断規準は上の式である。

Fig. 10 Upper bound of the number of machines against the number of failures in one round.

- : $T=2, \lambda=0.1, \mu=0.001$
.....: $T=1, \lambda=0.2, \mu=0.001$
- - - - : $T=1, \lambda=1, \mu=0.001$

分布関数による管理：

同様に、1 巡回間隔での故障が n_0 以上におこる確率を α 以下にするように、受持ちのできる最大の機械台数は次の式を満たす最大の N で与えられる。

$$\text{Prob} \{n \leq n_0\} > 1 - \alpha$$

b) 単位時間内の平均故障数とその管理：

糸故障修理ロボットは 1 巡回間隔で n_i 個糸故障を修理したとする。 m 巡回をしてから、単位時間での N 台機械全体の糸故障数 ξ は就業率 κ の計算と同様に、

$$\xi = \frac{\sum_{i=1}^m n_i}{\sum_{i=1}^m x_i}$$

で与えられる。

巡回回数 m が十分大きくなると、 $\sum_{i=1}^m n_i/m$ は 1 巡回間隔での修理した故障数の平均値 $N \times p$ に近付き、 $\sum_{i=1}^m x_i/m$ は巡回間隔の平均値に近づくことがわかる。(5)式の結果から、単位時間での N 台機械全体の糸故障数 ξ は

$$\xi = \frac{p\lambda}{T\lambda + p} \quad (23)$$

となる。

λ が一定の場合では、 ξ は(19)式の k と似たような変動を示す(図8)。 λ が小さくなると、1 巡回で 1 台の機械の故障する確率 p が大きくなるにもかかわらず、 ξ は徐々に小さくなる(図11)。

Fig. 11 Illustration of the relationship of ξ (the failure number in unit time) to λ^{-1} (mean of the repairing time).

($N = 30$; $\mu = .001$; — : $T = 1$,
..... : $T = 5$, : $T = 9$)

単位時間内の平均糸故障数を θ 以下にするという条件のもとで、修理ロボットの受持つことができる機械台数の最大値は次の式を満たす最大の N で与えられる。

$$(T\lambda + p)\theta > p\lambda \quad (24)$$

計算のアルゴリズムは 3 節 a) で与えられたものと同様で、ただし、ステップ 3) の判断規準は上の式である。その一例を図12に示す。

6. 繰糸工程の接緒作業への応用

定粒繰糸(繰糸工程において、1本の生糸をつくるための繭数を決めておき、常にその粒数を維持しながら繰糸を行う生産方法)においては、落緒(繭糸が切断すること)が発生するたびに、接緒しな

Fig. 12 Upper bound of the number of machines against the number of failures in unit time.

— : $T = 1$, $\lambda = .2$, $\mu = .001$
..... : $T = 5$, $\lambda = .33$, $\mu = .001$
..... : $T = 10$, $\lambda = 1$, $\mu = .001$

れない。定繰繰糸(繰糸感知器を用いて生糸繰度が所定の繰度より細くなったときに接緒を行う繰糸の方法)においては、落緒と繭糸の固有繰度曲線などの原因で、生糸が目標繰度の下限を下回るため、接緒が要求される。

接緒作業を行うシステムは本論文で検討している 1 方向巡回糸故障修理システムの特別の場合である。糸故障は落緒で、修理は接緒で、修理ロボットは給繭機(あるいは作業員)である。

繰糸工程において、給繭機が巡回しながら、接緒を行うが、接緒時間は機械の連続稼働時間及び給繭機の移動時間と比べればずっと短いため、無視することができる。しかし、落緒故障が発生しても、生産能力を維持するため、繰糸機械が停止せず、そのまま繰糸作業を続ける。従って、落緒の発生した時点にすぐ接緒しないので、糸むらという欠点が生じる。又、この落緒故障の上に、再び落緒故障が発生することもある。この場合、糸むらが悪化し、ある限界を越えると、生糸の品質を低下させることになる。

実際の製糸工場では、 K 台給繭機は一列に並んで、同一の速度で 1 方向に向かって、接緒の巡回を行っている。各給繭機的能力は同一で、ある繰糸機の 1 緒に対して、 K 台の一列の並んでいる給繭機は巡回速度が K 倍になった 1 台の給繭機と見なせる(作業員の巡回は給繭機と同様な巡回をすると仮定する)。

(1)修理時間: 接緒という修理時間は瞬間的に行われるので、修理時間が無視できる。又、給繭機は必要に応じて、数粒の繭を同時に給繭することができ。即ち、調べている繰糸機の緒はその直前の巡回

間隔で、いくら落緒故障が発生しても、すべて修理され、完全に回復することができる。

(2)移動時間：繰糸機の隣接する緒の間の給繭機の移動時間は T であるが、1 台の給繭機とみなすため、 T/K となる。

(3)巡回間隔：巡回は常に一定の時間 NT/K 、即ち、定間隔で行われる。

連続稼働時間と 1 巡回間隔で繰糸機の 1 緒が接緒を要求する確率：繰糸機が停止せずに生産しているが、1 方向巡回糸故障修理システムの連続稼働時間と対応するのは直前に接緒した時点から、その次の接緒が要求されるまでの時間である。定粒繰糸の場合では、解じょ糸長が指数分布と正規分布との混合分布をしているので、粒付数（1 本の生糸を作り上げるときの繭の数）が多いとき（8 粒ぐらい）、直前に接緒した時点からその次の接緒が要求されるまでの時間は指数分布で近似できる^{3,9)}。このとき、1 巡回間隔で繰糸機の 1 緒が接緒を要求する確率は、

$$p = 1 - \exp(-\mu NT/K) \quad (25)$$

で与えられる。

定織繰糸の場合は、直前に修理された時点から、初めての接緒要求が発生するまでの時間は定粒繰糸の考え方と同様に、繭の粒付数が多いとき、近似的に指数分布に従う^{3,9)}。従って、1 巡回間隔で繰糸機の 1 緒が接緒を要求する確率も上の式によって近似できる。

(5) 1 巡回での接緒回数：接緒が瞬間的に行われるとしているので、各繰糸機は完全に独立的に稼働していることとなる。従って、 N 緒繰糸機に対して、1 巡回における接緒回数はパラメータ N と(25)に示す p を持つ 2 項分布に従う。

(6)欠粒故障による糸むら長さの分布特性：

落緒のため、定粒繰糸の粒付数の欠粒故障がおこる。レベル 1（欠粒 1 粒）の上にレベル 2（欠粒 2 粒）、レベル 2 の上にレベル 3（欠粒 3 粒）の故障が発生し、それを修理することは給繭機（或は作業員）の主な仕事である。欠粒故障が発生すれば、ただちに修理すべきである。しかし、コストダウン、能率アップをはかるため、給繭機が巡回しながらたくさん機械を受け持っているため、糸むらが生じる。巻取速度が一定のとき、欠粒 n 粒の糸むらの長さは完全に欠粒 n 粒（レベル n ）の接緒待ち時間に決定される。

欠粒故障に対して、レベルが高いほど生糸品質に悪影響を与えるので、嶋崎らは巡回間隔がガンマ分

布に従うと仮定し、レベル n の欠粒故障の修理待ち時間について検討した⁶⁾。ここでは、定間隔巡回に対して、欠粒故障の修理待ち時間の分布特性を調べてみる。

繰糸機が接緒を要求したとき、給繭機がすぐ接緒するとは限らないので、生糸糸むらが生じることになる。糸むらの長さは接緒を要求する時点から接緒される時点までの時間の間に、巻かれた生糸の長さである。巻取速度が一定の時、糸むらの長さは完全に接緒待ち時間に決定される。

1 粒欠粒の接緒待ち時間は 2 節の検討と同様に、次のような一様分布に従うことがわかる。

$$g_1(w) = \begin{cases} 1/t_0 & w < t_0 \\ 0 & w \geq t_0 \end{cases} \quad (26)$$

ここに、 t_0 は NT/K を表す。

レベル 2 の欠粒故障がレベル 1 の欠粒故障のあった巡回間隔でしか発生しないので、その修理待ち時間 w_2 はレベル 1 の欠粒故障の修理待ち時間間隔の前方再帰時間と見なせる。従って、2 粒欠粒の接緒待ち時間の確率密度関数は、

$$g_2(w) = \begin{cases} 2(1-w/t_0)/t_0 & w < t_0 \\ 0 & w \geq t_0 \end{cases} \quad (27)$$

で与えられる。

同様に、3 粒欠粒の接緒待ち時間の確率密度関数は、

$$g_3(w) = \begin{cases} 3(1-w/t_0)^2/t_0 & w < t_0 \\ 0 & w \geq t_0 \end{cases} \quad (28)$$

で与えられる。

一般に、レベル n 欠粒故障の修理待ち時間 w_n はレベル $n-1$ の欠粒故障の修理待ち時間間隔の前方再帰時間と見なせるので、その確率密度関数 $g_n(w)$ は次式のように示される。

$$g_n(w) = \begin{cases} n(1-w/t_0)^{n-1}/t_0 & w < t_0 \\ 0 & w \geq t_0 \end{cases} \quad (29)$$

(7)欠粒故障による糸むら長さの管理基準：

生糸の糸むらは生糸が巻かれた検査板に現われるたてしま状の濃淡のむらと定義され、セリブレーンを用いて糸むら標準写真と対照しながら検査員の肉眼によって評価される。繰糸のとき、もし欠粒 n 粒が l_n 単位の時間を立つと糸むらとして検出されるとすれば、危険率 α で糸むらの発生を防ぐ管理基準

は,

$$P\{w_n < l_n\} \geq 1 - \alpha \quad (30)$$

で与えられる.

明らかに, もし NT/K を l_n より短いように調整することができれば, 欠粒 l_n 粒の糸むらを確実に防止することができる. しかし, 経済的あるいは技術的な原因で, NT/K が l_n より長いことは現実なのである. このとき, (29)式の結果を利用すれば, (30)式の基準は,

$$1 - l_n/t_0 < \alpha^{1/n} \quad l_n < t_0$$

で与えられる. ここに, t_0 は NT/K を表す.

参考文献

- 1) Cox, D. R. and Smith; *Biometrika*, **41**, 91-99 (1954).
- 2) Cox, D. R; "Renewal Theory", METHUEN, London (1962)
- 3) Feller, W; "An Introduction to Probability Theory and Its Applications", Volume II, 355-356, John Wiley & Sons, New York (1966)
- 4) 三浦幹彦; 日本蚕糸学雑誌, **46**, 93-98 (1977)
- 5) 嶋崎昭典; 日本蚕糸試験所報告, **16**, 403-529 (1961)
- 6) 嶋崎昭典; 日本蚕糸学雑誌, **57**, 17-22 (1988)
- 7) 寿国梁; 織機学会論文集, **42**, T1 (1989)