



修正法を用いた高精度加工組立生産システムに関する研究*

—最適な測定組立誤差範囲と修正加工量—

井山俊郎** 水野雅裕** 西川尚宏** 松井貴志***

Study on High Quality Machining-assembly Production System Applied a Corrective Assembly Approach
- The Optimal Range of Measurement Assembly Error and the Optimal Adjustment Size -

Toshiro IYAMA, Masahiro MIZUNO, Naohiro NISHIKAWA and Takashi MATSUI

In a high quality machining-assembly production system applied a corrective assembly approach, a measurement error, which occurs in measuring a processing error of assembly part, causes an incorrect allocation of reprocessing machines and reduces a production rate of high quality assembly products. In this paper we consider a method for maximizing the production rate of assembly products which consist of two assembly parts and satisfy a predetermined assembly tolerance. In this method two optimal parameters are searched in order to maximize the production rate: one is a range of measurement assembly error which determines how to select a correct reprocessing machine and another is an adjustment size of each reprocessing machine. A relay production system is used to present the validity of the method and to investigate effects of machining accuracy, measurement accuracy and adjustment accuracy on the maximum production rate and the optimal parameters. The two main results indicate: (1) A range of measurement assembly error and an adjustment size of each reprocessing machine affect the production rate of assembly products within a predetermined assembly tolerance. (2) There exist the optimal range and the optimal adjustment size which maximize the production rate, and they vary according to a combination of machining accuracy, measurement accuracy and reprocessing accuracy in a system.

Key words: machining error, measurement error, adjustment error, assembly error, tolerance, corrective assembly approach

1. 緒 言

製品の高性能化や小型化に伴い、製品に組み込まれる各種機械要素も高性能化や小型化が要求され、複数の部品で構成される各種機械要素に対しても、厳しい組立公差が要求されている。厳しい組立公差を実現するには、一般に、機械要素を構成する各部品に対し高精度加工を行い、加工精度を高める必要がある。しかし、高精度加工を実現するには、高精度の精密工作機械や熟練加工技術が必要になるため、生産効率が低下し生産コストは高くなる。したがって、機械要素のような高効率、低コスト生産が求められる量産製品に対し、高精度加工は適用が難しい。そこで、各種機械要素を高効率、低コストで生産するため、機械要素を構成する各部品は生産効率の高い工作機械を使用して量産される。しかし、この場合、各部品に対し加工誤差の発生が避けられず、加工された部品を加工順に組立てると要求された組立公差を満たさない組立製品が生産される。このため、加工誤差を持つ部品から要求された組立公差を満たす機械要素を高効率で生産する方法として、マッチング法が用いられている。

マッチング法は、加工誤差を持つ低精度の組立部品から高精度の組立製品を生産する方法である。この方法には、加工された組立部品の寸法を複数の小区間に分割し、部品別・区間別に用意されたバッファに各部品を一時的に貯え、組立誤差が組立公差を満たす小区間の部品を選択して組み立てる選択組立法と加工誤差を持つ組立部品を出力順に組み立てた場合の組立誤差

を推定し、組立誤差に応じて一部の部品に修正加工を施し、組立公差を満たすように組み立てる修正法が用いられている。

マッチング法に関する研究はこれまで数多く行われている。選択組立法に関しては、Fangら¹⁾、Chanら²⁾、Kannanら³⁾が、加工後の各組立部品の寸法を小区間に分割する場合の分割法や各区間の部品発生確率を等しくする分割法を提案し、余剰部品の最小化を追求した。Allen⁴⁾やKannonら⁵⁾は、各部品の加工誤差分布の標準偏差が大きいシステムや加工誤差中心が変動するシステムを対象にマッチング法を研究した。Soら⁶⁾、山田ら⁷⁾、Araiら⁸⁾、井山ら⁹⁾¹⁰⁾は、組合せ部品の組合せ順序、加工寸法の制御法、各区間の部品選択政策、バッファ導入効果が生産効率に及ぼす影響を明らかにした。最近になり、Kannanら¹¹⁾は、組立誤差が各組立部品の加工誤差の線形和で与えられる製品を対象として、組立誤差のばらつきを最小化するため、遺伝的アルゴリズムを適用した新たな選択組立法を提案した。また、修正法に関しては、山田ら¹²⁾が、微細加工を導入した高精度組立システムにおいて達成可能な最大生産率を得るため、修正法と選択組立法を組み合わせた新たなマッチング法を提案した。これらのマッチング法に関する研究の多くは加工誤差の影響のみを考慮したものが中心である。しかし、組立製品の高性能化や小型化に伴い、要求される組立公差が厳しくなっているため、加工誤差を測定する場合に発生する測定誤差が組立誤差に及ぼす影響を無視できなくなり、測定誤差を考慮した新たなマッチング法を考える必要がある。

測定誤差の影響を考慮した研究に関しては、井山ら¹³⁾が、修正法を適用したリレー生産システムを対象として、組立部品の加工誤差と測定誤差を考慮した場合の部品物流挙動を解析し、

* 原稿受付 平成 19 年 7 月 24 日

** 正 会 員 岩手大学 (盛岡市上田 4-3-5)

*** 一関ヒロセ電機㈱ (一関市東台 14-36)

測定誤差が不良品の発生に及ぼす影響を明らかにした。また、組立製品を対象としてはいないが、製品が持つ測定誤差の影響を考慮した類似の研究に Golhar ら¹⁴⁾、Hong ら¹⁵⁾、Duffuaa ら¹⁶⁾の研究がある。これらの研究は、製品が持つ測定値を小区間に分割し、各区間の製品に異なる価値を与え、製品全体の総価値を最大化する問題を扱い、製品が持つ測定値を小区間に分割する場合の区間誤差最小化問題を含んでいる。したがって、測定誤差が高精度組立製品の組立生産に及ぼす影響はあまり研究されていない。

本研究では、組立誤差に応じて修正機械を選択し修正加工を施す修正法を適用した高精度加工組立生産システムにおいて、加工誤差の測定時に測定誤差が発生し測定誤差による修正機械の誤選択が発生する状況下で、達成可能な最大生産率を生み出す方法を考える。具体的には、加工された2種類の部品の寸法の線形和で組立誤差が与えられる組立製品を対象として、各修正機械を選択する測定組立誤差範囲と各修正機械の修正加工量が、要求された組立公差を満たす製品の生産率に及ぼす影響を考慮し、達成可能な最大生産率を生み出す方法を考える。また、リレー生産システムを用いて、最大生産率を与える最適な測定組立誤差範囲と修正加工量の存在を明らかにし、システムで発生する加工精度、測定精度と修正加工精度が、要求された組立公差で達成可能な最大生産率および最適な測定組立誤差範囲と修正加工量に及ぼす影響を明らかにする。

2. 組立誤差と最適化問題

2.1 測定誤差と修正加工誤差を考慮した組立誤差

組立製品を構成する2種類の部品を部品A、Bとし、組立寸法を決定する部品A、Bの設計寸法を L_A 、 L_B とする。 L_A 、 L_B に対する加工誤差を ΔW_A 、 ΔW_B とし、組立寸法が L_A 、 L_B の線形和 $L=L_B+L_A$ で決定される場合、真実組立誤差 E_{tru} は式(1)で与えられる。

$$E_{tru}=(L_B+\Delta W_B)+(L_A+\Delta W_A)-(L_B+L_A) \\ =\Delta W_B+\Delta W_A \quad (1)$$

したがって、部品A、Bの加工寸法($L_A+\Delta W_A$)、($L_B+\Delta W_B$)に対する測定誤差を ΔM_A 、 ΔM_B とすると、測定組立誤差 E_{mea} は式(2)で与えられる。

$$E_{mea}=(\Delta W_B+\Delta M_B)+(\Delta W_A+\Delta M_A) \quad (2)$$

修正法は、修正加工量が異なる N 台の修正機械を用意し、真実組立誤差 E_{tru} に応じて適切な修正機械を選択し、一方の組立部品に修正加工を施し、要求された組立公差を満たす製品を組立てる方法である。このとき、修正機械 G_i ($i=1,2,\dots,N$) の修正加工量を K_i とすると修正加工量を考慮した真実組立誤差は $\Delta W_B+\Delta W_A+K_i$ で与えられる。したがって、修正機械 G_i の修正加工誤差を ΔV_i とすると、修正機械 G_i を用いて修正加工後の真実修正組立誤差 E_{rev} は式(3)で与えられる。

$$E_{rev}=\Delta W_B+\Delta W_A+K_i+\Delta V_i \quad (3)$$

この結果、要求された組立公差を $|T|$ とすると、正しい真実組立誤差 E_{tru} を用いて修正機械を選択し $|E_{rev}| \leq |T|$ の場合に組立公差を満たす製品が生産される。しかし、真実組立誤差は未知のため、通常、既知の組立誤差である測定組立誤差 E_{mea} を用いて修正機械を選択する。このとき、一般に、 E_{mea} の値は E_{tru} の値と異なるため、 G_i と異なる修正機械が選択される可能性が

あり、 G_j ($j \neq i$) が選択された場合、修正加工後の測定修正組立誤差 E'_{rev} は、修正機械 G_j の修正加工誤差を ΔV_j とすると、式(4)で与えられる。

$$E'_{rev}=\Delta W_B+\Delta W_A+K_j+\Delta V_j \quad (4)$$

この結果、修正機械の誤選択により本来修正すべき加工量と異なる加工量が与えられ、一部の組立製品では $|E'_{rev}| > |T|$ となり、要求された組立公差を満たさない製品が生産され生産率は低下する。

2.2 最適化問題

前述のように、組立部品の寸法を測定する場合に発生する測定誤差は、修正機械の誤選択を引き起こし生産率は低下する。したがって、要求された組立公差を満たす製品を生産するには、測定誤差が発生するという条件下で、測定組立誤差 E_{mea} を用いて正しい修正機械を選択する必要がある。修正機械選択時に修正機械 G_j を選択する測定組立誤差範囲 $[I_j, J_j]$ ($j=1,2,\dots,N$) が生産率に大きな影響を与えることになる。この結果、修正機械 G_j の修正加工量 K_j が与えられ、測定誤差が発生するという条件下で要求された組立公差 $|T|$ を満たす製品の生産率を最大化する問題は、測定組立誤差範囲 $[I_j, J_j]$ が設定された場合の生産率を $R(I_j, J_j)$ とすると $R(I_j, J_j)$ を最大化する最適な $[I_j, J_j]$ を探索する問題となり、式(5)で与えられる問題を解く必要がある。

$$\text{目的関数: } \text{Max. } [R(I_j, J_j) \mid K_j, |T|] \quad (5)$$

$$\text{制約条件: } I_j < J_j \quad (j=1,2,\dots,N), \quad J_j = I_{j+1} \quad (j=1,2,\dots,N-1)$$

ただし、修正加工時に修正加工誤差が発生するので、修正加工誤差の影響も考慮する必要がある。生産率は、 $|E'_{rev}| \leq |T|$ を満たす総製品数の生産された総部品数に対する割合とする。制約条件は、修正機械を選択するための測定組立誤差範囲を連続させるための条件である。

また、測定組立誤差と真実組立誤差が異なり、本来選択すべき修正機械と異なる修正機械が選択される場合、本来修正加工されるべき加工量と異なる加工量で修正加工が行われる。しかし、修正加工後の測定修正組立誤差が要求される組立公差を満たすように、修正機械の修正加工量が設定されていれば、修正機械の誤選択が発生しても、要求された組立公差を満たす製品は生産可能である。したがって、修正機械 G_j の修正加工量 K_j は生産率に影響を与えることになる。この結果、修正機械を選択する測定組立誤差範囲が与えられ、測定誤差が発生するという条件下で要求された組立公差 $|T|$ を満たす製品の生産率を最大化する問題は、修正加工量 K_j が設定された場合の生産率を $R(K_j)$ とすると $R(K_j)$ を最大化する最適な K_j を探索する問題となり、式(6)で与えられる問題を解く必要がある。

$$\text{目的関数: } \text{Max. } [R(K_j) \mid I_j, J_j, |T|] \quad (6)$$

$$\text{制約条件: } I_j < J_j \quad (j=1,2,\dots,N), \quad J_j = I_{j+1} \quad (j=1,2,\dots,N-1)$$

上述の2つの問題は、修正機械の修正加工量が与えられた場合の最適な修正機械選択法を設定する問題と修正機械選択法が与えられた場合の最適な修正機械の修正加工量を設定する問題である。しかし、修正機械選択法の設定は修正加工量の影響を受け、修正加工量の設定は修正機械選択法の影響を受けると考えられる。したがって、修正法を用いた高精度加工組立生産システムで達成可能な最大生産率を求めるには、修正機械を選択する測定組立誤差範囲と修正機械の修正加工量を同時に最適化する必要がある。この問題は、測定組立誤差範囲 $[I_j, J_j]$ と修

正加工量 K_j が設定された場合の生産率を $R(I_j, J_j, K_j)$ とすると $R(I_j, J_j, K_j)$ を最大化する最適な $[I_j, J_j]$ と K_j を同時に探査する問題となり、式(7)で与えられる問題を解く必要がある。

$$\begin{aligned} \text{目的関数: } & \text{Max.}[R(I_j, J_j, K_j) \mid |T|] \quad (7) \\ \text{制約条件: } & I_j < J_j \quad (j=1,2,\dots,N), \quad J_j = I_{j+1} \quad (j=1,2,\dots,N-1) \end{aligned}$$

3. リレー生産システムとシミュレーションモデル

リレーはアーマチュア(部品A)とベース(部品B)の2種類の主要組立部品で構成され、部品A, Bの接点高さをそれぞれ L_A, L_B とすると、組立公差は $L = L_B - L_A$ に対して設定される。このとき、リレー生産システムでは、量産された各部品の L_A, L_B を加工順に測定し、測定寸法から測定組立誤差を求め、その後、測定組立誤差を用いて修正機械を選択し、部品Aに修正加工を施して部品A, Bを組み立てる。このため、 L_A, L_B の加工寸法測定時に測定誤差が発生するので、修正機械の誤選択が発生し、要求された組立公差を満たさないリレーが生産される。したがって、リレー生産システムでは、2.における式(1), (2), (3)の代わりに式(1)', (2)', (3)' を使用する。

$$\begin{aligned} E_{tru} &= \Delta W_B - \Delta W_A \quad (1)' \\ E_{mea} &= (\Delta W_B + \Delta M_B) - (\Delta W_A + \Delta M_A) \quad (2)' \\ E_{rev} &= \Delta W_B - \Delta W_A + K_j + \Delta V_j \quad (3)' \end{aligned}$$

リレー生産システムに対し、式(7)で与えられる達成可能な最大生産率および最大生産率を与える最適な測定組立誤差範囲 $[I_j, J_j]$ と修正加工量 K_j を探査する問題は、解析的に解くことが困難なため、シミュレーション手法を用いて解く。使用したシミュレーション手順を以下に示す。ただし、シミュレーション期間は部品生産個数 50,000 個の期間とする。

- Step1: 修正機械 G_j を選択する測定組立誤差範囲 $[I_j, J_j]$ ($j=1,2,\dots,N$) と G_j の修正加工量 K_j を設定する。
- Step2: 乱数を発生させ、部品A, Bの加工誤差 $\Delta W_A, \Delta W_B$ を決定し、真実組立誤差 E_{tru} を計算する。
- Step3: 乱数を発生させ、部品A, Bの測定誤差 $\Delta M_A, \Delta M_B$ を決定し、測定組立誤差 E_{mea} を計算する。
- Step4: 測定組立誤差範囲と E_{mea} を用いて修正機械 G_j を決定する。
- Step5: 乱数を発生させ、修正加工誤差 ΔV_j を決定し、 E_{tru} に選択した修正機械の修正加工量と修正加工誤差を加え、測定修正組立誤差 E'_{rev} を計算する。
- Step6: Step5 で求めた測定修正組立誤差と組立公差を比較し、組立公差を満たす製品かどうかを判定する。
- Step7: Step2~6 をシミュレーション期間で繰り返し、組立公差を満たす製品の生産率を求める。

4. 解析

リレー生産システムで達成可能な最大生産率と最大生産率を与える各修正機械の最適な測定組立誤差範囲と修正加工量を明らかにする。基準システムパラメータとして、修正機械台数 $N=3$ 、修正機械 G_j ($j=1, 2, 3$) を選択する測定組立誤差範囲 $[I_j, J_j] = [-30, -10], [I_2, J_2] = [-10, 10], [I_3, J_3] = [10, 30]$ μm 、修正機械 G_j の修正加工量 $K_1 = -20, K_2 = 0, K_3 = 20$ μm 、修正機械 G_j の修正加工精度 $3OR_1 = 3OR_3 = 10$ μm 、 $3OR_2 = 0$ 、部品A, Bの加工精度 $[3OW_A, 3OW_B] = [30, 15]$ μm 、部品A, Bの測定精度 $3OMA = 3OMB = 10$ μm を用いる。ただし、各修正機

械は L_A に対し修正加工を施す以外に全ての部品Aに対し共通の追加の加工を行うが、追加の加工は組立誤差に影響を持たないため、 L_A に対し修正加工を行う G_1 と G_3 でのみ修正加工誤差が発生する。また、加工誤差、測定誤差、修正加工誤差の分布は正規分布とし、分布の平均は $0 \mu\text{m}$ 、各精度は誤差分布標準偏差の3倍とする。基準システムパラメータの一覧を表1に示す。

4.1 最大生産率、最適な測定組立誤差範囲と修正加工量の探査

リレー生産システムで達成可能な最大生産率および最大生産率を与える最適な測定組立誤差範囲と修正加工量を探査する。修正機械 G_j ($j=1,2,3$) を選択する測定組立誤差範囲 $[I_j, J_j]$ を $[I_1, J_1] = [-30, j1], [I_2, J_2] = [j1, j2], [I_3, J_3] = [j2, 30]$ μm として、 $-j1 = j2 = jj$ を $0 \sim 30$ μm の範囲で $1 \mu\text{m}$ 刻みに変化させ、同時に、修正機械 G_j の修正加工量 $-K_1 = K_3 = kk$ を $0 \sim 30$ μm の範囲で $1 \mu\text{m}$ 刻みに変化させ、測定組立誤差範囲と修正加工量が生産率に及ぼす影響を調べる。

4.2 基準システムパラメータにおける解析

表1に与える基準システムパラメータの下で、組立公差 $|T|$ を $20, 15, 10, 5$ μm と変化させ、各組立公差において jj と kk が生産率 R に及ぼす影響を調べ結果の一部を図1に示す。また、各組立公差における最大生産率 R_{max} と最大生産率を与える最適な測定組立誤差範囲 jj^* と最適な修正加工量 kk^* を表2に示す。表2には、比較のため、最適化前の基準システムパラメータの測定組立誤差範囲と修正加工量を用いた場合の生産率 R_0 も同時に示す。

図1から、測定組立誤差範囲と修正加工量は共に生産率に影響を及ぼし、各修正加工量における最適な測定組立誤差範囲と各測定組立誤差範囲における最適な修正加工量が存在することがわかる。このとき、 $|T|$ が減少し組立公差が厳しくなるにつれ、測定組立誤差範囲と修正加工量の生産率に及ぼす影響は大きくなる。また、表2から、各組立公差に対し、最大生産率を与える最適な測定組立誤差範囲と修正加工量の組合せが存在することがわかる。このとき、各組立公差に対し最大生産率を与える最適な測定組立誤差範囲と修正加工量は以下のように変化する。組立公差が厳しくなるにつれ、 G_2 を選択する測定組立誤差範囲は基準システムパラメータの $10 \mu\text{m}$ からわずかに狭まり、修正加工量は基準システムパラメータの $20 \mu\text{m}$ から大きく減少する。修正加工量が大きく減少する理由としては、本来、 G_2 を選択すべきだが、 G_1, G_3 を誤選択したため大きな修正加工が施され組立公差を満たさなくなる製品の数を、修正加工量を少なくすることで減少させる効果をめざしたためと考えられる。

4.3 加工精度の影響

部品A, Bの加工精度が最大生産率および最適な測定組立誤

Table 1 Standard system parameters

Number of reprocessing machines	$N=3$
Range of measurement assembly	$I_1 = -30, J_1 = I_2 = -10, J_2 = I_3 = 10, J_3 = 30 \mu\text{m}$
Machining accuracy	$3OW_A = 30, 3OW_B = 15 \mu\text{m}$
Measurement accuracy	$3OMA = 3OMB = 10 \mu\text{m}$
Adjustment size	$K_1 = -20, K_2 = 0, K_3 = 20 \mu\text{m}$
Adjustment accuracy	$3OR_2 = 0, 3OR_1 = 3OR_3 = 10 \mu\text{m}$
Machining error, measurement error and adjustment error distributions	Normal distribution

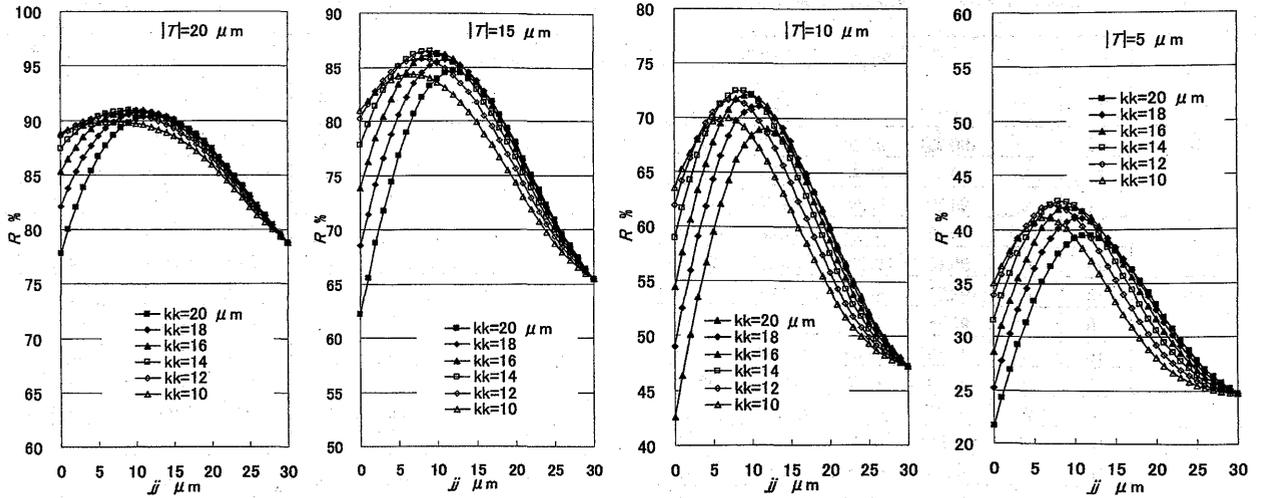


Fig. 1 Effects of the range of measurement assembly error and adjustment size on production rate

Table 2 The optimal range of measurement assembly error and the optimal adjustment size for the maximum production rate

T μm	(30WA, 30WB)=(30, 15) μm			
	R_{max} %	R_0 %	kk^* μm	jj^* μm
20	90.95	90.15	16	10
15	86.48	83.94	14	9
10	72.51	68.41	14	9
5	42.68	39.23	13	8

差範囲と修正加工量に及ぼす影響を調べる。組立公差 $|T|=20, 15, 10, 5\mu\text{m}$ に対し、加工精度 $[30WA, 30WB]$ を $[30, 15], [25, 12.5], [20, 10], [15, 7.5] \mu\text{m}$ と変化させた場合の R_{max} と jj^*, kk^* を表3に示す。表3には、各組立公差において R_{max} を与えた jj^*, kk^* を用いた場合に R_{max} を与えた組立公差以外の組立公差で得られる生産率 R と最適化前の基準システムパラメータの測定組立誤差範囲と修正加工量を用いた場合の生産率 R_0 も同時に示す。

表3から、達成可能な最大生産率は、加工精度が高くなるにつれ、基準システムパラメータで得られる生産率よりも大きく増加することがわかる。このとき、加工精度が同一の場合、各組立公差で最大生産率を与える最適な測定組立誤差範囲と修正加工量の組み合わせは、他の組立公差に対してもほぼ最大生産率に近い生産率を与える。また、最適な測定組立誤差範囲は、各加工精度に対し、ほとんど変化しないが、最適な修正加工量は、加工精度が高くなるにつれ、大きく減少する。したがって、各加工精度に対し、最大生産率を与える最適な測定組立誤差範囲と修正加工量は正しく探索する必要がある。しかし、加工精度が同一の場合、任意の組立公差に対する最適な測定組立誤差範囲と修正加工量は、他の幅広い組立公差に対する最大生産率を得るために使用可能と考えられる。

4.4 測定精度の影響

部品A, Bの測定精度が最大生産率および最適な測定組立誤差範囲と修正加工量に及ぼす影響を調べる。 $|T|=20, 15, 10, 5\mu\text{m}$ に対し、測定精度 $30MA=30MB$ を $10, 7.5, 5\mu\text{m}$ と変化させた場合の R_{max} と jj^*, kk^* を表4に示す。表4には、各組立公差において R_{max} を与えた jj^*, kk^* を用いた場合に R_{max} を与えた組立公差以外の組立公差で得られる生産率 R と最適化前の基準システムパラメータの測定組立誤差範囲と修正加工量を用いた場合の生産率 R_0 も同時に示す。

表4から、達成可能な最大生産率は、測定精度が高くなるにつれ、

Table 3 Effects of machining accuracy

(30WA, 30WB) μm	kk* μm	jj* μm	$(R_{max}, R, [R_0])$ %			
			T μm			
			20	15	10	5
(30,15)	16	10	(90.95)	86.28	72.13	42.06
	14	9	90.90	(86.48)	72.51	42.55
	14	9	90.90	86.48	(72.51)	42.55
	13	8	90.79	86.21	72.22	(42.68)
	20	10	[90.15]	[83.94]	[68.41]	[39.23]
(25,12.5)	14	10	(95.05)	90.99	77.20	45.94
	13	9	95.03	(91.09)	77.59	46.47
	13	8	95.02	91.05	(77.69)	46.63
	12	8	94.96	90.96	77.65	(46.89)
	20	10	[93.78]	[87.12]	[70.71]	[40.75]
	(20,10)	12	10	(98.01)	95.22	82.76
12		10	98.01	(95.22)	82.76	51.10
10		8	97.92	95.15	(83.22)	51.87
10		7	97.88	95.08	83.19	(51.96)
20		10	[96.17]	[89.34]	[72.54]	[42.10]
(15,7.5)		9	9	(99.54)	98.25	89.29
	9	10	(99.54)	98.20	89.16	58.08
	9	11	(99.54)	98.13	88.68	57.35
	9	9	99.54	(98.25)	89.29	58.40
	8	8	99.52	98.17	(89.48)	58.60
	7	7	99.48	98.03	89.28	(58.72)
	20	10	[96.91]	[89.79]	[74.15]	[44.77]

つれ、基準システムパラメータで得られる生産率よりも増加することがわかる。このとき、測定精度が同一の場合、各組立公差で最大生産率を与える最適な測定組立誤差範囲と修正加工量の組み合わせは、他の組立公差に対してもほぼ最大生産率に近い生産率を与えるが、測定精度が高くなるにつれ、組立公差が厳しい所で、最大生産率より低い生産率を与える。また、最適な測定組立誤差範囲と修正加工量は、各測定精度に対しほぼ同様な値をとるが、修正加工量は、測定精度が高くなるにつれ、組立公差の影響を大きく受ける。したがって、各測定精度と組立公差に対し、最大生産率を与える最適な測定組立誤差範囲と修正加工量は正しく探索する必要がある。

4.5 修正加工精度の影響

部品A, Bの修正加工精度が最大生産率および最適な測定組立誤差範囲と修正加工量に及ぼす影響を調べる。 $|T|=20, 15, 10, 5\mu\text{m}$ に対し、修正加工精度 $30RA=30RB$ を $10, 7.5, 5\mu\text{m}$ と変化させた場合の

Table 4 Effects of measurement accuracy

3 σ_{MA} =3 σ_{MB} μm	kk*	j*	(R _{max}), R, [Rd] %			
			T μm			
			20	15	10	5
10	16	10	(90.95)	86.28	72.13	42.06
	14	9	90.90	(86.48)	72.51	42.55
	14	9	90.90	86.48	(72.51)	42.55
	13	8	90.79	86.21	72.22	(42.68)
	20	10	[90.15]	[83.94]	[68.41]	[39.23]
7.5	18	11	(92.58)	89.38	76.28	44.61
	16	9	92.54	(89.67)	77.41	46.32
	15	8	92.46	89.54	(77.49)	46.65
	13	7	92.18	88.88	76.71	(46.89)
	20	10	[92.30]	[88.32]	[74.19]	[43.16]
5	18	12	(93.58)	91.95	79.69	46.22
	19	12	(93.58)	91.98	79.54	45.93
	18	11	93.58	(92.19)	81.06	47.35
	16	9	93.50	91.98	(82.26)	49.82
	13	7	93.13	90.56	80.67	(51.31)
	20	10	[93.50]	[91.99]	[79.59]	[46.12]

R_{max}とj*, kk*を表5に示す。表5には、各組立公差においてR_{max}を与えたj*, kk*を用いた場合にR_{max}を与えた組立公差以外の組立公差で得られる生産率Rと最適化前の基準システムパラメータの測定組立誤差範囲と修正加工量を用いた場合の生産率R₀も同時示す。

表5から、達成可能な最大生産率は、修正加工精度が高くなるにつれ、基準システムパラメータで得られる生産率よりも増加することがわかる。このとき、各修正加工精度に対しほぼ同様な値となり、修正加工精度が同一の場合、各組立公差で最大生産率を与える最適な測定組立誤差範囲と修正加工量の組み合わせは、他の組立公差に対してもほぼ最大生産率に近い生産率を与える。また、最適な測定組立誤差範囲と修正加工量は、各修正加工精度に対し、ほぼ同様な値をとり、組立公差の影響もほとんど受けない。したがって、修正加工精度が最大生産率に及ばず影響はかなり小さいと考えられる。修正加工精度の影響が小さい理由としては、修正加工精度が加工精度よりも高く、修正機械を選択後の修正加工時に発生するためと考えられる。

5. 結 言

本研究では、修正法を適用した高精度加工組立生産システムにおいて、測定誤差による修正機械の誤選択が発生する状況下で達成可能な最大生産率を生み出す方法を考えた。また、リレー生産システムを用いて、修正機械を選択する測定組立誤差範囲と修正機械の修正加工量が生産率に及ぼす影響を明らかにし、システムで発生する加工精度、測定精度と修正加工精度が、要求された組立公差で達成可能な最大生産率および最大生産率を与える最適な測定組立誤差範囲と修正加工量に及ぼす影響を明らかにした。本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 要求された組立公差を満たす組立製品の生産率を最大化するには、修正機械を選択する測定組立誤差範囲と修正機械の修正加工量の最適化を考える必要がある。
- (2) 加工精度、測定精度と修正加工精度は生産率に影響を持ち、各精度の組合せに対し、最大生産率を与える最適な測定組立誤差範囲と修正加工量が存在する。
- (3) 加工精度、測定精度、修正加工精度が与えられた場合、任意の組立公差において得られる最適な測定組立誤差範囲と修正加工量は、測定精度が高い場合を除いて、他

Table 5 Effects of adjustment accuracy

3 σ_R =3 σ_{R2} μm	kk*	j*	(R _{max}), R, [Rd] %			
			T μm			
			20	15	10	5
10	16	10	(90.95)	86.28	72.13	42.06
	14	9	90.90	(86.48)	72.51	42.55
	14	9	90.90	86.48	(72.51)	42.55
	13	8	90.79	86.21	72.22	(42.68)
	20	10	[90.15]	[83.94]	[68.41]	[39.23]
7.5	15	9	(91.15)	86.96	73.35	43.10
	15	9	91.15	(86.96)	73.35	43.10
	15	9	91.15	86.96	(73.35)	43.10
	14	8	91.13	86.88	73.31	(43.32)
	20	10	[90.41]	[84.46]	[68.99]	[39.59]
5	15	8	(91.27)	87.16	73.78	43.43
	15	9	91.26	(87.28)	73.93	43.52
	14	8	91.25	87.23	(74.06)	43.87
	14	8	91.25	87.23	74.06	(43.87)
	20	10	[90.56]	[84.84]	[69.39]	[39.67]

の組立公差に対し、最大生産率に近い生産率を与える。

(4) 修正加工精度が最大生産率に及ばず影響は小さい。

本研究では、モデル工場データを参考にして、加工誤差、測定誤差、修正加工誤差の各分布に平均ゼロの正規分布を用いたが、各工場で発生する分布にはさまざまな分布が考えられる。この場合、本研究で提案した方法に各工場で発生する分布を適用することで、最適な修正加工量と測定組立誤差範囲を探索可能であるが、以下のような影響を与えると考えられる。①加工誤差分布は真実組立誤差分布と測定組立誤差分布を決定するので、加工誤差分布の変化は各修正機械の修正加工後の真実修正組立誤差および各修正機械の選択確率と誤選択確率を変化させ、最適な修正加工量と測定組立誤差範囲に影響を与える。②測定誤差分布は測定組立誤差分布を決定するので、測定誤差分布の変化は各修正機械の選択確率と誤選択確率を変化させ、最適な測定組立誤差範囲に影響を与える。③修正加工誤差分布は修正加工後の真実修正組立誤差分布を決定するので、修正加工誤差分布の変化は各修正機械の修正加工後の真実修正組立誤差を変化させ、最適な修正加工量と測定組立誤差範囲に影響を与える。

しかし、一般に、加工精度が最も低く、修正加工量は各修正機械の修正加工可能な部品確率の影響を大きく受け、測定組立誤差範囲は各修正機械の選択確率と誤選択確率の影響を大きく受ける。したがって、各分布が変化しても、真実組立誤差分布が与える各修正機械の修正加工可能な部品確率が、また、測定組立誤差分布が与える各修正機械の選択確率と誤選択確率が、解析に使用した平均ゼロの正規分布とほぼ同様な確率を持つ場合、本研究の結果が適用可能と考えられる。

また、本研究では、高精度組立製品を高能率で量産する場合に用いられるマッチング法の中で修正法を適用した生産システムを対象として、測定誤差の発生による生産率低下問題を扱った。しかし、マッチング法では選択組立法も多くの製品の生産システムに適用されており、そのようなシステムにおける測定誤差の影響も明らかにする必要がある、今後の課題である。

参 考 文 献

- 1) Fang, X. D. and Zhang, A. Y.: "New Algorithm for Minimizing the Surplus Parts in Selective Assembly", *Comp. and Ind. Eng.*, **28**, 2, (1995)341.
- 2) Chan, K. C. and Lin, R. J.: "A Grouping Method for Selective Assembly of Parts of Dissimilar Distributions", *Quality Eng.*, **11**, 2, (1998)221.

- 3) Kannan, Sm. and Jayabalan, V.: "A New Grouping Method to Minimize Surplus Parts in Selective Assembly for Complex Assemblies", *Int. J. Prod. Res.*, **39**, 9, (2001)1851.
- 4) Allen, G.: "Selective Assembly with Components of Dissimilar Variance", *Comp. and Ind. Eng.*, **23**, 1, (1992)487.
- 5) Kannan, Sm. and Jayabalan, V.: "Process Design to Control the Mismatch in Selective Assembly by Shifting the Process Mean", *Proc. of Int. Conf. on Quality Eng. and Manage.*, Coimbatore, South India, (1997)85.
- 6) So, K. C. and Scott, C. H.: "Optimal Production Sequence for a Product with Matching Components", *Oper. Res.*, **42**, 4, (1994)694.
- 7) 山田泰弘: "連続生産の選択組立における組合せ最適化", *機論*, **60**, 573C, (1994)1877.
- 8) Arai, T. and Takeuchi, K.: "A Simulation System on Assembly Accuracy", *Annals. of the CIRP*, **41**, 1, (1992)37.
- 9) 井山俊郎,水野雅裕,田牧純一,乾英一: "マッチングを考慮した加工・組立自動生産システムに関する研究(最大生産率を与える部品加工精度分布組合せ領域)", *機論*, **64**, 625C, (1998)3667.
- 10) 井山俊郎,水野雅裕,田牧純一,武田一成: "マッチング法を適用した加工・組立システムにおける部品寸法制御政策", *機論*, **64**, 627C, (1998)4428.
- 11) Kannan, Sm., Jayabalan, V. and Jeevanantham, K.: "Genetic Algorithm for Minimizing Assembly Variation in Selective Assembly", *Int. J. Prod. Res.*, **41**, 14, (2003)3301.
- 12) 山田泰弘,古村義彰,水谷淳之介,田辺郁男: "選択組立と微細加工を併用した高精度組立システムにおける部品の組合せ最適化手法", *精密工学会誌*, **65**, 11, (1999)1579.
- 13) 井山俊郎,水野雅裕,梅木史恩,田牧純一,林光明,佐藤雅昭: "加工誤差と測定誤差を考慮した高精度組立生産システムの物流挙動(高精度リレー生産の場合)", *機論*, **69**, 680C, (2003)1161.
- 14) Golhar, D. and Pollock, S.: "Cost Saving due to Variance Reduction in a Canning Problem", *IIE Trans.*, **24**, 1, (1992)89.
- 15) Hong, S. H. and Elsayed, E. A.: "The Optimum Mean for Processes with Normally Distributed Measurement Error", *J. Quality Tech.*, **31**, 3, (1999)338.
- 16) Duffuaa, S. O. and Siddiqui, A. W.: "Process Targeting with Multi-class Screening and Measurement Error", *Int. J. Prod. Res.*, **41**, 7, (2003)1373.