

選択組立における組合せ最適化

—自動車エンジンの事例—

山田 泰弘, 古林 隆

1. はじめに

特性にばらつきのある部品から、高精度な組立品を低コストで生産するために選択組立が行われる。

従来より、部品をその特性に応じて幾つかのクラスに区分けし、対応するクラスに属する部品をランダムに組立てる層別法 (Grouping Method) が、電子部品、ベアリングなどの組立に適用されている [1-5]。

選択組立の方法として近年注目されているのが、コンピュータによる組合せ最適化を適用する方法である。部品の特性のばらつきを許容し、ロット単位で全ての部品の特性情報を参照して最適な部品の組合せを決定し、選択的に組立てることが可能になっている [6-11]。組合せ最適化手法による選択組立は、層別法に換わる極めて優れた方法であることが明らかにされている [8]。また山田・古林 [9, 10] は、2 部グラフの最小費用マッチングアルゴリズムを用いた選択組立によって、ロット単位で単に組立率を最大にするだけでなく、組立品を構成している部品間の特性差を最適化できることを示し、その効果を明らかにした。

本研究では、軸部品と穴部品の選択組立が行われている自動車エンジンの事例を取り上げる。まず、軸部品の軸径の分布を穴部品の穴径から許容隙間を引いた値の分布にできるだけ近づけるために、軸径の工程平均を変えて軸部品を生産して混合することにする。次に、このようにして得られる軸部品と穴部品に対して、従来から行われている層別法と最小費用マッチング法による選択組立とをシミュレーションで比較し、後者がいかに優れているかを示す。

やまだ やすひろ 長岡技術科学大学工学部
〒940-21 長岡市上富岡町1603-1
こばやし たかし 法政大学工学部
〒184 小金井市梶野町3-7-2
受理 94. 4. 27

2. 選択組立問題

2 種類の部品を組立てて半製品または製品を生産している工程を考える。ここでは、軸部品と穴部品を組立てる場合をとりあげる。部品規格に適合して組立工程に供給されている部品のロットサイズを、それぞれ N_p, N_h とおく。 i 番目の軸部品の軸径と j 番目の穴部品の穴径をそれぞれ D_{pi}, D_{hj} とし、軸部品と穴部品の隙間に対する組立規格 (最小隙間 C_L , 最大隙間 C_U) が規定されているものとする。

すなわち

$$C_L \leq D_{hj} - D_{pi} \leq C_U \quad (1)$$

を満たすときに限り i 番目の軸部品と j 番目の穴部品は組立可能とする。

組立品の集合を組合せということにすると、 N_p, N_h のうち小さいほうが組合せの大きさ (組立てられた部品数) の上限となるが、この上限に対する組合せの大きさの比率を組立率と呼ぶこととする。

組立率を高めることは最も重要であるが、組立率を最大にするような組合せは、一般に複数存在する。そこで、そのような組合せの中で、さらに組立品を構成する穴部品と軸部品の隙間 $D_{hj} - D_{pi}$ の分布を最適にすることを考える。

3. 選択組立手法

従来より選択組立手法として適用されている層別法と、組合せを最適化する最小費用マッチング法による選択組立について述べる。

3. 1 層別法

図 1 に示すように、予め、部品の特性が分布する範囲を、組立規格 (式(1)) に適合する区間幅 $(C_U - C_L) / 2$ を有する複数のクラスに分割し、部品を個々の特性に応じてクラスに保管するためのバッファを選択組

立工程に設ける。軸部品と穴部品が1個ずつ選択組立工程に供給される毎に、その軸径、穴径を参照し、部品が属するクラスに組合せ対象部品がある場合は、組立てることによって組立規格に適合する組立品が得られる。組合せ対象部品が無い場合は、部品を該当するクラスのバッファに保管する。従って、バッファに保管した部品の寸法は不要となるため、寸法の記憶装置は持たない。



図1：層別法

3. 2 最小費用マッチング法を利用した選択組立

図2に示すように、ロット単位で、最大マッチングの中から組立品の隙間の二乗和が最小となるマッチングを求める。



図2：最小費用マッチング法を利用した選択組立

いま、2種類の部品に対応する N_A, N_B 個の点からなる2つの点集合 V_A, V_B と、組立規格に適合する部品の対に相当する点同士、すなわち式(1)を満たす $i \in V_A, j \in V_B$ を結んだ枝 (i, j) の集合 E から成る2部グラフ $G=(V_A, V_B; E)$ を考えると、組合せは、このグラフでマッチングになり、最大組立率を得る組合せは最大マッチングになる。さらに、それらの中の最適な組合せは、全ての枝に対して適当に費用を定めたときの最小費用マッチングになる。ここでは、組立品の隙間と組立規格の下限(最小隙間 C_L)との差をできるだけ小さくするために、費用 L_{ij} を次のように定めて、最小費用マッチングを求めることとする[9]。

$$L_{ij} = (D_{hj} - D_{pi})^2 \quad (2)$$

最小費用マッチングを求めるアルゴリズムはいろいろ考えられているが、プライマル・デュアル法[12]を用いることにした。

4. 事例解析

ここでは、ある自動車部品メーカーにおいて生産されている自動車エンジン用バルブリフター(図3)の選択組立事例について解析する。バルブリフターを構成する軸部品と穴部品は、組立状態における摺動特性を保証するために、組立規格を最小隙間 $C_L=4.0\mu\text{m}$ 、最大隙間 $C_U=5.0\mu\text{m}$ の範囲で厳しく管理して組立てられている。軸径 D_p の分布を $N(\mu_p, \sigma_p^2)$ 、穴径 D_h の分布を $N(\mu_h, \sigma_h^2)$ とする。ただし、 D_p, D_h の単位は μm である。 μ_p は加工時に適宜変更可能であるが、 μ_h は固定である。また、分散は大きく異なっていて、 $\sigma_p^2=0.294, \sigma_h^2=2.193$ である。

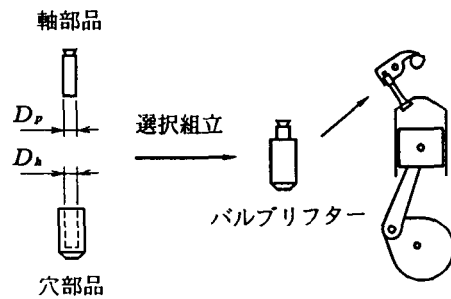


図3：自動車エンジン用バルブリフター

4. 1 軸径分布の最適化

組立率を大きくするには、軸径 D_p の分布が穴径 D_h から許容隙間の中心値 $4.5\mu\text{m}$ を引いた値の分布に近い方がよいが、 $\sigma_p^2 < \sigma_h^2$ であるので、 μ_p を一つの値に固定したのでは、 D_p の分布は $D_h-4.5$ の分布に近づかず、いかにマッチングを良くしても組立率を大きくすることはできない。そこで、 μ_p のいくつかの値に対して軸部品を生産し、それらを混合する。すなわち、いくつかの μ_p に対する軸径分布を合成することで、軸径の分布を $D_h-4.5$ の分布に近づける。

$\mu = \mu_h - 4.5$ とおくと、軸径の分布の合成問題は、以下のように記述される。

$N(\mu_i, \sigma_p^2) (i=1, 2, \dots, m)$ に従う確率変数を X_i とする。このとき、確率 p_i で $X=X_i$ となる確率変数 X を考える。ただし、 $\sum p_i=1$ とする。このとき、 X の分布が $N(\mu, \sigma_h^2)$ にできるだけ近くなるように $(\mu_i), (p_i)$ を定めよ。

ここで、 μ_i は第 i 群の軸部品の平均であり、 p_i は

第 i 群から軸部品を選ぶ割合(第 i 群の生産比率)である。

$$\bar{\mu} = \sum p_i \mu_i \text{ とすると,}$$

$$E[X] = \bar{\mu} \quad (3)$$

$$V[X] = \sigma_p^2 + \sum p_i \mu_i^2 - \bar{\mu}^2 \quad (4)$$

となる。

X_i の分布関数を $f_i(x)$ とすると X の分布関数 $f(x)$ は

$$f(x) = \sum_{i=1}^m p_i f_i(x) \quad (5)$$

となる。

また、 $N(\mu, \sigma_h^2)$ の分布関数を $g(x)$ として、 $f(x)$ と $g(x)$ の近似の程度を

$$S = \int_{-\infty}^{+\infty} |f(x) - g(x)| dx \quad (6)$$

で表すことにする。

以上より、条件 $p_i \geq 0 (i=1, 2, \dots, m), \sum p_i = 1, E[X] = \mu, V[X] = \sigma_h^2$ のもとで S を最小にするように $(\mu_i), (p_i)$ を定めることにする。

4. 2 シミュレーション

ここでは、シミュレーションにより、層別法と最小費用マッチング法による選択組立を比較し検討する。

計算項目は、組立率の平均、組立品の隙間の平均とし、軸径の分布とロットサイズの影響を検討する。

軸径 D_p の分布は、次の 2 つの場合について検討する。

① 3 種類の分布を合成した場合 ($m=3$)

$\mu_1 = \mu - \delta, \mu_2 = \mu, \mu_3 = \mu + \delta, p_1 = p_3$ として、 S を最小にする $\delta, (p_i)$ を求めたところ、 $\delta = 1.777\mu m, p_1 = p_3 = 0.3, p_2 = 0.4$ を得た。 $f(x)$ と $g(x)$ のグラフを図 4 に示す。このとき、 $S = 38.2\%$ であった。

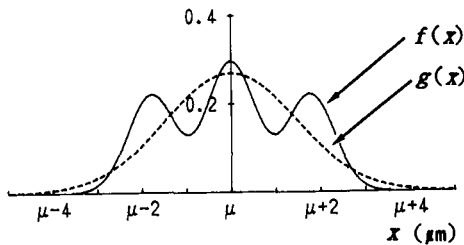


図 4 : $m=3$ で S を最小にする軸径分布

② $D_h = 4.5$ の分布と同じにした場合 ($m = \infty$)

$D_p \sim N(\mu_h - 4.5, \sigma_h^2)$ (μm) とする。このとき、 $S = 0\%$ である。

また、ロットサイズは、10~1000 について検討する。以上の条件のもとで、モンテカルロ・シミュレーション 1000 回を実施した結果を以下に示す。

4. 2. 1 組立率

軸径分布およびロットサイズが組立率に及ぼす影響について、シミュレーションした結果を図 5 に示す。

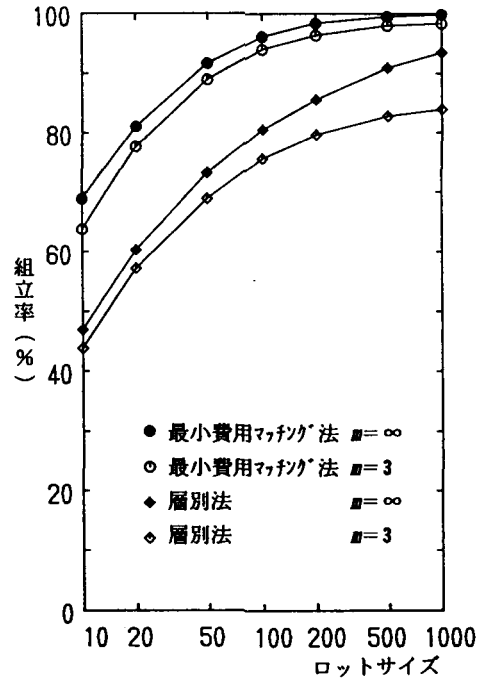


図 5 : 軸径分布およびロットサイズと組立率の関係

層別法について検討する。ロットサイズ 10 では $m=3$ で 43.8%, ∞ で 46.9% であり、ロットサイズ 1000 では $m=3$ で 83.9%, ∞ で 93.5% である。ロットサイズが小さい場合は、組立対象部品が少ないことから軸径分布の影響はあまり現れていない。ロットサイズが大きくなると、組合せ対象部品が多くなることから軸径分布の影響が現れて、 S が少ない軸径分布にするほど高い組立率が得られる。ロットサイズを大きくすることによって組立率を高めることが可能であるが、 $m=3$ では 85% 程度に収束している。層別法において組立率を高くするには、ロットサイズを大きくするとともに、 S を少なくするように軸径分布を合成することが必要である。

最小費用マッチング法による選択組立について検討する。ロットサイズ10では $m=3$ で63.8%、 ∞ で68.9%であり、ロットサイズ1000では、 $m=3$ で98.4%、 ∞ で99.8%である。層別法の場合と比較して、 $m=3$ と ∞ での組立率の差が少ないのは、全ての部品の寸法を参照して組合せを最適化する効果が現れているためである。最小費用マッチング法による選択組立では、層別法のように軸径分布の合成による S の低減を厳密に行わなくても、高い組立率が得られることに優位性が認められる。最小費用マッチング法による選択組立では、 $m=3$ の軸径分布でさえ、層別法で $m=\infty$ の軸径分布を用いた場合よりも常に高い組立率が得られる。

4. 2. 2 組立品の隙間

軸径分布およびロットサイズが組立品の隙間に及ぼす影響について、シミュレーションした結果を図6に示す。

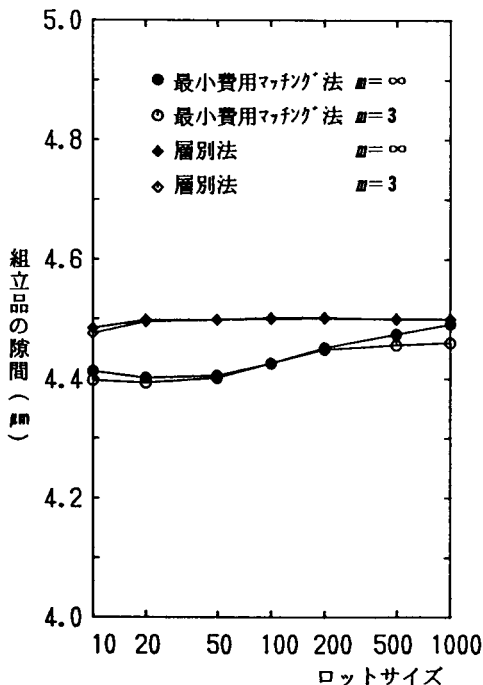


図6：軸径分布およびロットサイズと組立品の隙間の関係

軸径分布を $m=3$ から ∞ に変えても、層別法、最小費用マッチング法による選択組立とも、組立品の隙間はほとんど変わらない。

層別法では、ロットサイズを変えても組立品の隙間

は常に $4.5\mu\text{m}$ である。

最小費用マッチング法による選択組立では、組立規格の最小隙間 $C_L=4.0\mu\text{m}$ を隙間の目標値として、最大マッチングの中から、隙間の二乗和(式(2))を最小にする組合せを求めて隙間のばらつきを低減している。層別法よりも組立率が高いながらも隙間が目標値に近い組立品が多く得られている。

5. まとめ

本研究においては、嵌合部寸法の分散が小さな軸部品と分散が大きな穴部品を選択組立する自動車エンジンの組立事例を取り上げ、現在行われている層別法に換えて、最小費用マッチング法による選択組立を適用する有効性をシミュレーションによって考察した。この結果、以下の結論を得た。

- (1)軸部品の加工寸法を適宜変更し、それらを混合した分布を穴部品の分布に近づけることによって、組立率を高めることができる。層別法の場合、組立率を高めるために、これらの分布がかなり近くなるように軸径分布の合成を管理する必要がある。最小費用マッチング法による選択組立を適用すれば、軸径分布を3種類合成する程度の近似で、層別法では得られなかった高い組立率が得られる。
- (2)ロットサイズを500程度まで大きくすれば、最小費用マッチング法による選択組立によって、層別法では得られなかった100%近い組立率が得られる。
- (3)最小費用マッチング法による選択組立を適用すれば、層別法よりも高い組立率のもとで、より目標値に近い隙間の組立品を得ることも期待できる。

最後に、事例についての貴重な資料を提供していただいた(株)タナカエンジニアリング各位に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- [1] Yampol'skyy, L. S., Holovanov, B. O. : Extremal, Optimal, Adaptive, and Self-Adjusting Systems, *Soviet Automatic Control*, Vol. 4, No. 1, 1971, 30-36.
- [2] Catton, M. J. : Computer Aided Selective Assembly of Mika Capacitors, *Proceedings of the 3rd International Conference on Assembly Automation and 14th IPA Conference*, Stuttgart, W. Germany, 1982, 461-470.

- [3] Sumin, V. V. Podobryanskii, A. V. Kislitsyn, A. B. Vorobev, V. I. : Calculation of the Part Classification Conditions for Selective Assembly, *Sov. J. of Opt. Technol.*, Vol. 51, No. 3, 1984, 135-138.
- [4] 井山・ほか3名：マッチングを考慮した加工・組立自動生産ラインの挙動解析（モデル化と加工精度の影響），日本機械学会論文集C編，Vol. 58, No. 551, 1992, 2249-2254.
- [5] Arai, T., Takeuchi, K. : A Simulation System on Assembly Accuracy, *Annals of the CIRP*, Vol. 41, No. 1, 1992, 37-40.
- [6] Fujino, Y. : Matching Problem When Lot Size is Large, *Rep. Stat. Appl. Res., JUSE*, Vol. 34, No. 4, 1987, 1-10.
- [7] Malmquist, E. : Selective Assembly - the Third Road to Variability Reduction, *Linköping Studies in Science and Technology*, Thesis No. 214, Linköping University, Linköping, Sweden, 1990.
- [8] 山田泰弘・藤野和建：最大マッチングアルゴリズムの選択組立への適用，日本品質管理学会誌，Vol. 22, No. 4, 1992, 335-342.
- [9] 山田泰弘・古林隆：選択組立における組合せ最適化 -ばらつき最小化基準-，日本品質管理学会誌，Vol. 23, No. 4, 1993, 409-415.
- [10] 山田泰弘・古林隆：選択組立における組合せ最適化 -ミニマックス基準-，日本品質管理学会第23回年次大会講演・研究発表要旨集，1993, 109-112.
- [11] 山田泰弘：連続生産の選択組立における組合せ最適化，日本機械学会論文集C編，Vol. 60, No. 573, 1994, 1877-1881.
- [12] 古林隆：ネットワーク計画法，培風館，1984.