

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：25503

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26870774

研究課題名(和文) 統計公差指標を用いた製品性能に基づく許容差設計法の開発と実用性の検証

研究課題名(英文) Development of tolerance design method based on product performance using statistical tolerance index and verification of practicality

研究代表者

大塚 章正(Otsuka, Akimasa)

山陽小野田市立山口東京理科大学・工学部・講師

研究者番号：90611848

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：単純な製品モデル上で、加工誤差として正規乱数を公差の範囲内で発生させ、1000個単位で製品を模擬的に生成した後、有限要素法を用いて全ての製品性能を計算しその分布を評価した。統計公差指標(工程能力指数の許容限界)の値を変えていき分布結果を比較した結果、統計公差指標を図面に指示することで製品性能を管理できることを確認した。また、モンテカルロ法と実数値遺伝的アルゴリズムを組み合わせた統計公差指標の設計法も開発した。

研究成果の概要(英文)：For a simple product model, normal random numbers were generated within specified conventional-tolerance as machining error. A thousand pieces of product were simulatively generated, and product performance of those were respectively calculated using the finite element method software. Frequency distributions about product performance were calculated. Those processes were repeated by changing the values of statistical tolerance index. Comparing the calculation results, effectiveness of statistical tolerance index was confirmed. Furthermore, design method of statistical tolerance index was also developed, which was consisting of the Monte-Carlo simulation and the real-coded genetic algorithm. The effectiveness of the method was confirmed through case studies using a virtual product.

研究分野：設計工学

キーワード：公差設計 幾何公差 品質管理 工程能力指数 CAE

1 . 研究開始当初の背景

機械製品の設計では、概念設計から始まり、基本設計、詳細設計の流れで行われることが一般的である。詳細設計では、製品の機能限界のみならず、製造コスト、部品互換性、組み立て性、加工可能性なども考慮して公差設計が行われる。また、CAE による解析は主に基本設計の中で活用されているが、最近では詳細設計においても利用されており、製造誤差のばらつきを考慮した公差設計などにも応用されつつある。

一方、製造現場では設計図面に指示された公差を基に統計的工程管理下で部品が加工され、製品としてそれらが組み立てられている。工程管理では歩留りを基準に部品寸法の平均とばらつきが適正範囲に入るよう管理される。組み立て後の製品は高確率で要求仕様を満たす。これは、機能の合否を基準に予め各部品の公差が設計されているからである。しかし、合格品でも機能の良し悪しが存在してしまう。本研究ではその良し悪しの程度を性能と呼ぶこととする。この性能に対する要求が高まりつつある現在、性能を考慮した公差設計法の開発が望まれている。

研究代表者は本研究課題開始前より、統計公差指標に着目し研究を進めてきた(図 1 参照)。統計公差指標とは、従来の公差の指示に加え工程能力指数 (Cp, Cpk, Cc, Cpm) の限界値を図面上に指示することで、製造誤差に起因するばらつきを設計段階で管理する手法である。しかし、各部品に指示された統計公差指標が組み立てた製品にどう影響するかという問題については、これまでに研究されてこなかった。また、その統計公差指標の有効性も明確ではなく、定量的な検証を行った報告は見られない。

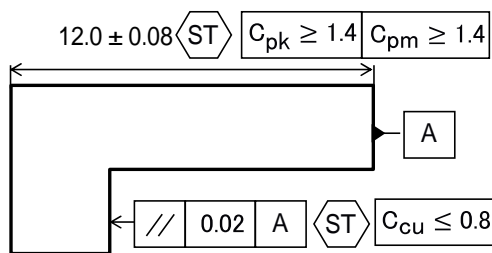


図 1 統計公差指標が指示された図面の例
(六角形棒 ST より右側の指示)

2 . 研究の目的

研究期間内において、大きく分けて二つの小テーマを同時に並行して進めた。以下、それぞれの研究テーマ名を A, B と名付ける。

(1) 研究テーマ A

各部品に対して寸法・幾何公差と統計公差指標が指示された時の組み立て品への影響(公差解析に相当)を明らかにする。また、その結果を用いて統計公差指標の設計法(分配法)を開発することを目的とする。

(2) 研究テーマ B

従来の公差のみの指示された場合と統計公差指標を追加した場合の比較を行い、製品性能のばらつき管理に対する統計公差指標の有効性を検証することを目的とする。

3 . 研究の方法

(1) 研究テーマ A

幾何公差に統計公差指標を適用するためには片側公差に対応した工程能力指数 Cp1, Cpu, Ccl, Ccu を導入する。これらの工程能力指数を用いた統計公差指標が設計要素に同時に指示された場合、組み立て品での制約はかなり複雑になるため、その制約を解析的に求めることは難しくなる。そこで、近似的に求める手法としてモンテカルロ法と凸包を用いたアルゴリズムを提案し、事例を通してその有効性を示す。

(2) 研究テーマ B

指示する統計公差指標の値と製品性能の分布を分析することで、統計公差指標の有効性を検証する。分析対象の製品として、単純な形状の片持ち梁を取り上げる。片持ち梁の製造誤差は、各基準寸法に正規乱数を与えることで模擬する。統計公差指標の指示の有無は、与える正規乱数のパラメータを調整することで模擬する。片持ち梁の製品性能は自由端のたわみ量とする。たわみ量の計算には、有限要素法ソフトウェアである COMSOL を用いる。量産シミュレーションとして十分な量の片持ち梁を準備し、各々のたわみ量を計算したのちに頻度分布を作成し、統計公差指標の影響を分析した。

4 . 研究成果

(1) 研究テーマ A

研究テーマ A に関しては、以下の 3 つの成果を得た。

統計公差指標 Cpk と Cc の最適値を計算するアルゴリズムを開発した。ケーススタディとして、各部品の寸法が線形に積み重なる 5 部品で構成された仮想製品を用いてその有効性を検証した。仮想製品の性能は望目特性を有しており、その目標値は公差域中央にあると仮定している。歩留まり率(Cpk>1.5 相当)と製品性能の要求を同時に満たすよう、各々の部品に統計公差指標を設計できることを確認した〔雑誌論文〕。

表 1 部品の仕様と開発したアルゴリズムを用いて求めた各部品の統計公差指標

部品番号					
公称寸法 (mm)	24	10	35	12	24
公差 (mm)	0.10	0.06	0.20	0.08	0.12
Cpkの指示値	1.40	1.00	2.00	1.29	1.48
Ccの指示値	0.61	0.70	0.52	0.60	0.57

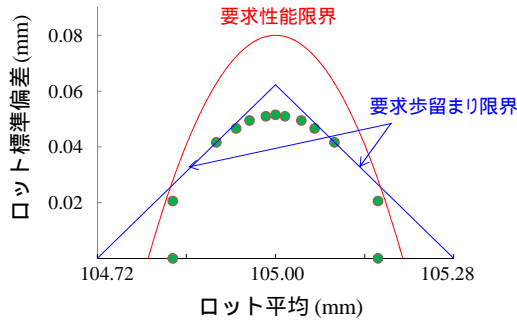


図 2 表 1 の統計公差指標が指示された時の製品のロット平均と標準偏差は必ず要求限界を満たす (緑色の点群)

同様に、製品性能と製造コストに基づいた工程能力指数 C_{pm} と狙い寸法 の設計法を考案した。この手法は、製品性能がどの特性 (望小、望大、望目) を有していても、適用可能である。また、要求性能を満たす中でコストが最小となるよう、遺伝的アルゴリズムを用いて C_{pm} と の設計値を求めることが可能となった [雑誌論文 , 学会発表]。

統計公差指標として C_p , C_{pk} (C_{pl} , C_{pu}), C_c (C_{cl} , C_{cu}), C_{pm} が同時に複合的に指示された部品を積み上げた時の累積問題に対して、モンテカルロ法と凸包を用いて近似解を得るアルゴリズムを開発した (図 3, 図 4)。この成果により、様々な統計公差指標の累積問題を近似的に解くことが可能となった [学会発表]。

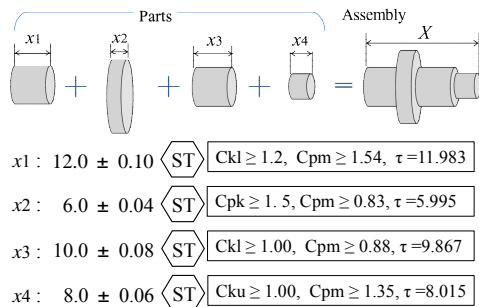


図 3 ケーススタディ用の仮想製品の仕様

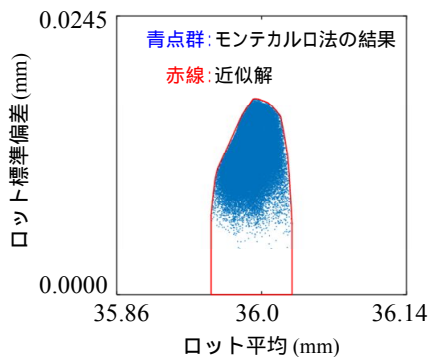


図 4 統計公差指標の累積問題に対する数値計算結果の一例

(2) 研究テーマ B

統計公差指標の有効性を検証するために、簡単な構造である片持ち梁を取り上げた。他の様々な要因を排除することができるため、検証に単純な構造の製品を用いることは公差研究の分野では一般的である。片持ち梁には様々な特性があるが、本研究ではたわみ量を製品性能として取り上げ、統計公差指標の有効性を検証した。この検証は寸法公差と幾何公差の各々に対して行う予定であったが、技術的問題のため幾何公差に対しては行えなかった。その点についても報告する。

寸法公差における有効性の検証

検証の際に用いる製品モデルとして、単純な片持ち梁 (長さ 100mm × 幅 25mm × 高さ 10mm の直方体) を用いた (図 5 参照)。片持ち梁の材料、公称寸法、寸法公差、外力は固定値とした。加工誤差は梁の各公称寸法値 (長さ、幅、高さ) に対して、公差値に収まるような正規乱数を与えることで模擬した。その上で、統計公差指標の指示値を変えてたわみ量の分布を比較分析する。統計公差指標は、各寸法値に与えられる正規乱数の平均と標準偏差に制約をかけることで模擬した。

この条件で、ランダムな寸法を有する片持ち梁を 1000 個用意し、それぞれのたわみ量を計算し分布を得る。そのプロセスを、寸法の平均と標準偏差を変えながら繰り返した。計算結果の一例を図 6 に示す。指示する C_{pk} の値によりたわみ量の分布のばらつきや偏りが抑えられることを確認した。これにより、統計公差指標により製品性能を管理できることが示された [学会発表]。

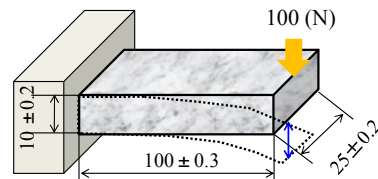


図 5 ケーススタディに用いた仮想製品 (材料、寸法、公差値、外力は一定とする)

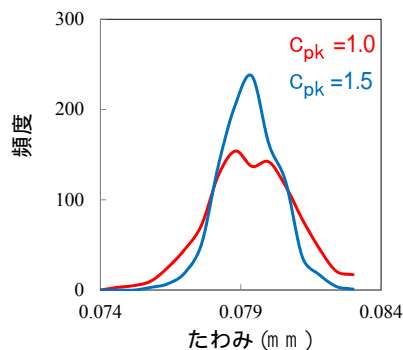


図 6 片持ち梁のたわみ量の分布と C_{pk} の値による比較

幾何公差における有効性の検証

前述の片持ちを用いて検証を行った。片持ち梁に指示する幾何公差として、図7に示すように下面をデータム平面とする上面の平行度公差を想定した。実際の機械加工面には反りやうねりもあるが、形状の異方性の影響が入ってくるため、まずはそれを考慮しない方向で平行度偏差のモデル化を行った。今回は0.6mmの平行度公差を想定し、上面4隅の高さをその範囲内にばらつかせることで平行度偏差を模擬した。

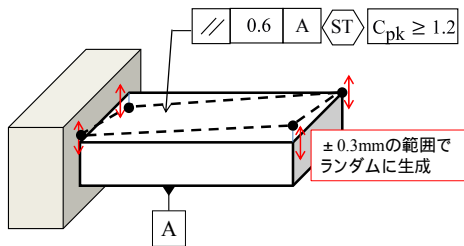


図7 仮想製品の平行度公差のモデル化

この条件で1000個のモデルを生成し、片持ち梁の自由端のたわみを計算した。しかし、統計公差指標で制限する分布パラメータに収まるように平行度を調整することができなかった。このため、製品の性能分布は出力されるものの、統計公差指標の有効性の確認までは行えなかった。この点は今後解決すべき課題である。

(3) その他の成果

研究を遂行した上で得られたその他の知見を報告する。

統計公差指標は製品の寸法誤差の分布を正規分布と仮定しているが、実際の分布は非正規分布になることが多い。特に幾何公差の場合は片側公差であるため、その傾向が大きくなる。そこで、非正規性分布のモデルとして分布を用いてその影響を調査した。分布は2つのパラメータにより形状、平均、標準偏差が決まる。逆に、与えられた平均と標準偏差を有する分布も一意に決定される。この性質を利用して、ある平均と標準偏差を持つ正規分布と分布を用意し、工程能力指数 $C_{pk} > 1.0$ の範囲内において、両分布で計算した製品性能の相対誤差を分析した。

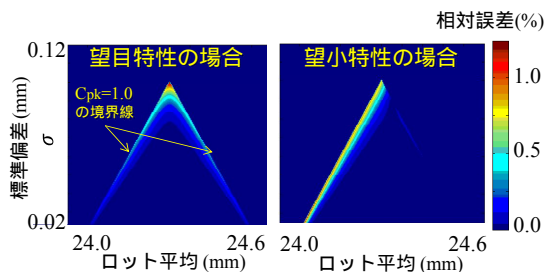


図8 分布を仮定した場合と正規分布を仮定した場合の製品性能の相対誤差

製品性能のテストケースとして望小特性と望目特性の2種類を用いて数値実験を行った。その結果、図8に示すように、工程能力指数が $C_{pk} > 1.0$ の条件下では、性能の相対誤差は0.2%以下であった〔学会発表〕。性能設計においては、分布の非正規性の影響は少ないといえる。

平行度偏差を持つ表面モデルの生成に関して、今回は4隅の点の高さのみをランダム生成して模擬した。しかし、実際に機械加工された表面は、反りやうねり成分の凹凸を有している。単純な片持ち梁の場合でさえ、同一の平行度偏差を有しながら製品性能が異なることが多々起こる。つまり、幾何公差に起因する性能の変動を分析するには、幾何公差に指示される値だけではなく方向性を含めて論じる必要があると考えられる。この問題認識を通して、異方性を考慮した幾何公差のモデリング技術の確立という新たな課題が明確になった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2件)

Akimasa Otsuka, Fusaomi Nagata, Design method of Cpm based on Product Performance and Manufacturing Cost, Computers & Industrial Engineering, 2017, 査読有, 採択済・掲載待ち.
DOI: 10.1016/j.cie.2017.04.025

Akimasa Otsuka, Fusaomi Nagata, Optimal allocation of statistical tolerance indices by genetic algorithms, Artificial Life and Robotics, Vol. 19, No. 3, pp. 227-232, 2014, 査読有.
DOI: 10.1007/s10015-014-0157-x

〔学会発表〕(計 4件)

Akimasa Otsuka, Verification of Product Performance Management by Process Capability Index, Proceedings of The 17th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference, 2016年12月7日, 台北(台湾), 査読有.

Akimasa Otsuka and Fusaomi Nagata, Design Method of Cpm-Index based on Product Performance and Manufacturing Cost, Proceedings of The 16th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference, pp. 1013-1020, 2015年12月8日, ホーチミン(ベトナム), 査読有.

Akimasa Otsuka and Fusaomi Nagata, Stack-up Analysis of Statistical Tolerance Indices for Linear Function Model Using Monte Carlo Simulation,

Proceedings of the 20th International
Conference on Engineering Design,
Vol. 6, No. 1, pp. 143-152, 2015年7月
27日,ミラノ(イタリア),査読有.

Akimasa Otsuka and Fusaomi Nagata,
The Effect of Non-Normality on
Statistical Tolerance Index,
Proceedings of The 15th International
Conference on Precision Engineering,
pp. 301-305, 2014年7月23日,ホテル日
航金沢(石川県・金沢市),査読有.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大塚 章正 (Otsuka Akimasa)
山陽小野田市立山口東京理科大学・
工学部・講師
研究者番号： 90611848