

様 式 C - 1 9、F - 1 9 - 1、Z - 1 9 (共通)

科学研究費助成事業

研究成果報告書



令和 4 年 6 月 1 7 日現在

機関番号 : 5 3 6 0 1

研究種目 : 基盤研究(C) (一般)

研究期間 : 2017 ~ 2021

課題番号 : 1 7 K 0 6 1 3 2

研究課題名 (和文) 設計工学における公差解析の学術体系化

研究課題名 (英文) Academic systematization of tolerance analysis in design engineering

研究代表者

鈴木 伸哉 (Suzuki, Shinya)

長野工業高等専門学校・電子制御工学科・准教授

研究者番号 : 9 0 6 1 6 1 2 9

交付決定額 (研究期間全体) : (直接経費) 3,700,000 円

研究成果の概要 (和文) : 本研究は、公差解析に関する学術を広く調査・収集して体系化し、その過程で全体を俯瞰して不足点を補い、公差解析を学術として発展させることを目的とした。文献調査、実地調査、ソフトウェアの調査を行い、公差解析に関わる情報を収集し、公差解析が、公差の累積、統計学、幾何公差、コンピュータ化 (CAD)、生産管理といったカテゴリにベン図的にまたがっていることを明らかにした。その中でも、比較的に重要かつ、研究が十分行われていなかった「がた」において、基本的な位置決めの種類を網羅的にあつめ、それらの計算方法を図による可視化と、定式化を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、公差解析に関わる全体像をまとめ、その成果を設計工学会の日本設計工学会2021年度春季研究発表講演会のフォーラムにて講演し、さらに設計工学会誌の5月号で特集を組んだ。従来、離散していた公差解析に関わる学術分野において、ある一定の体系だてを行うことができた。この特集での解説記事は、学会のMost Interesting Reading賞の評価を得た。さらに、研究調査の過程で用語の統一を行い、JIS B 0625公差解析用語として制定されたり、幾何公差と公差解析」をテーマにした書籍を出版予定であり、現在校正中である。これにより、公差解析に関わる学術体形をまとめ上げることができた。

研究成果の概要 (英文) : The purpose of this study was to survey, collect, and systematize the science related to tolerance analysis extensively, and in the process, to develop tolerance analysis as an academic discipline by taking a bird's eye view of the whole process and filling in the missing points. Literature survey, field survey, and software survey were conducted to collect information related to tolerance analysis. The results show that tolerance analysis spans the categories of Venn diagram, such as tolerance accumulation, statistics, geometric tolerancing, CAD, and production control. Among these categories, the basic types of positioning were collected comprehensively, and their calculation methods were visualized and formulated by means of diagrams, especially for the relatively important but under-researched category of gata.

研究分野 : 設計工学, 幾何公差

キーワード : 公差解析 幾何公差 3D-CAD がた

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

主に大量生産する製品について、部品の寸法にばらつきが生じた場合でも、狭いすきまを確保する、あるいは機械の性能を確保するために公差解析が用いられ、設計工学の中でも必須の学問である。しかし、日本では、公差解析に関する学術書が昭和 39 年に発行された「公差便覧」以来、50 年ほどない。近年になって公差解析が再び注目され、いくつかの技術書が出版されているが、体系的にまとめられていない。

2. 研究の目的

本研究は、公差解析に関する学術を広く調査・収集して体系化し、その過程で全体を俯瞰して不足点を補い、公差解析を学術として発展させることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、公差解析を調査するにあたり、文献・調査、海外への実地調査による。

4. 研究成果

公差解析は、設定する公差の妥当性を検証することをいい、高専・大学などの課程で扱われることは少ないが、機械設計に関係する企業では、社内資料、社内研修、先輩社員の指導といった形で教育されているようである。公差解析のもっとも主要な計算方法は、組立品に関する各公差を単純に加算するワーストケースと、各公差を二乗してルートをとる二乗和平方根である。これに加えて、組立品の構成から、がたも考慮にいった計算がされている。上記の計算を駆使すれば、およそその実務に対応できるように思えるが、推定平均シフト法、6 法、システムモーメント法、直接線形化法などもある。さらに、幾何公差を公差解析に適用する場合に、配慮しなければならないこともあれば、品質工学や遺伝アルゴリズムを応用した公差解析もある。

このように、公差解析には、実務によく用いられる部分と、実務でさして用いられていなくても、多くの学術研究・技術が行われて、それらが、どのようなことを行ってきたいて、どの程度有用で、また実務にも転用し得るのか、といったことが明らかではなかった。そこで、主に日本とアメリカの文献を調査し、それらを整理して体系化を行った。

4.0 ワーストケースと二乗和平方根

公差の累積の最も基本的な計算方法（公差計算）に、ワーストケースと二乗和平方根がある。 10 ± 0.1 と指示された板を実際に作って、10 枚積み上げた時の高さ（これを解析寸法と呼ぶ）は、すべての板が 10.1 で作られた場合に 101 で、すべての板が 9.9 で作られた場合に 99 なので、 100 ± 1 と見積もることができる。この ± 1 を累積公差と呼ぶ。この計算方法または状態をワーストケースと呼ぶ。

しかし、すべての部品が、必ず公差の上限と下限で作られることは、現実的でない。そこで、先の例の 10 枚の板を積み重ねた高さを $100 \pm \sqrt{10 \times 0.1^2}$ と見積もる。この計算方法を二乗和平方根と呼ぶ。

4.1 調整係数

公差の累積を見積もるにあたり、ワーストケースでは必要以上に余裕を取りすぎ、二乗和平方根ではいくつかの前提が必要となり見積もりとして余裕が少なすぎる。これは、公差の累積に係する数（累積要素数）にも依存するが、二乗和平方根に定数（調整係数）を掛けて余裕を見積もることがある。この定数のほとんどは経験値であり、1968 年に提案された Benderizing の 1.5 が有名である。これは今でもアメリカで使われている。他にも似た取り組みがなされているが、いずれも二乗和平方根での累積公差に 1.5 を掛けた値に近い。ただし、Bender は、図面の公差に調整係数 1.5 をかけておいて、その後実際の生産から解析寸法の評価を行い、指定した公差を満たさない箇所に対して部品の修正をするかどうかの判断をするように、累積公差を単に二乗和平方根の 1.5 倍で求めればよいという趣旨ではないようである。

このような実験的に導かれた調整係数に対し、Sholz は正規分布を $c=1$ とし、様々な分布の調整係数を標準偏差に応じて提案している。たとえば、三角分布で $c=1.225$ 、半円分布で $c=1.5$ 、一様分布で $c=1.732$ である。他にも調整係数には多くの提案があるが、結局のところ、Bender のように、ある種の仮定をして、実際の製造工程を調査するほかないと考えている。別の表現をすれば、工程の情報が多ければ公差は緩和できる可能性があって、工程の情報が少なければ公差を緩和するのは難しいと言えるのではないだろうか。

4.2 推定平均シフト法

二乗和平方根の大きな問題の一つは、平均のシフトを考慮していないことである。たとえば、プレス部品やモールド部品のように金型の摩耗によって、次第に平均がシフトすることが知られている。

加工者は、このシフトを考慮して、あえて公差の上限、または下限の近くに部品をつくることもしばしばある。この平均シフトを考慮に入れたのが、Mansoor である。さらにそれを発展させた Greenwood らが推定平均シフト法を提案した。平均シフト法は、二乗和平方根の特別な場合をワーストケースと位置付け、両者を統合している。さらに Gerith は、推定平均シフト法の累積公差を式(1)のように定式化している。

$$T = \sum_{i=1}^n \left| m_i \frac{\partial f}{\partial x_i} \text{tol}_i \right| + \sqrt{\sum_{i=1}^n (1 - m_i)^2 \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \text{tol}_i^2}$$

ここで、1 番目の項は、ワーストケースの累積公差を表し、2 番目の項は、二乗和平方根の累積公差を表している。 m_i は、0 ~ 1 をとる分布のかたよりを表す係数で、 $m_i = 1$ でワーストケース、 $m_i = 0$ で二乗和平方根を採用したことになる。Gerith によれば m_i はたいてい 0 か 1 をとるようである。

平均シフトについては、さらに、工程能力指数 C_p , C_{pk} と関係づけた 6 法があり、Scholz は、先に述べた調整係数と関連付け体系づけた。

4.3 分布の合成

これまで扱っている分布は、Scholz の調整係数を除けば、正規分布のみであった。ところが、組立てのばらつきとして、一様分布が実際のばらつきに近い場合もあるかもしれないし、加工された形体の実際のばらつきが半円分布に近い場合もあるかもしれない。このようなときに、分布を合成するための方法には、モンテカルロ法とシステムモーメント法とがある。

4.3.1 モンテカルロ法

モンテカルロ法は、公差の累積に関係する寸法に乱数を与えて、組立品の解析寸法の結果を求める方法で、コンピュータを用いて数万回以上のシミュレーションから解析寸法の分布を得て、適合率を求める。

板の積み上げのような 1 次元の公差解析で、正規分布や一様分布の合成であれば、表計算ソフトウェアでもある程度の対応はできるし、市販のソフトウェアであれば、与える分布は、正規分布以外にも、一様分布、三角分布、半円分布等の分布を与えて、それらを合成した結果を得えたり、公差の配分の最適化を行ったりすることもできる。

4.3.2 システムモーメント法

システムモーメント法は、分布のもつ平均 μ 、分散 σ^2 、ゆがみ γ_1 、とがり β_2 をもとに、合成した分布を求めることができる。その起源は、わかっている限りでは 1956 年に Tukey が提案していて、その後、1975 年 ~ 76 年に Evans が論文を発表し、1986 年に Cox が書籍を出版している。JIS B 0625:2021 の附属書でも、その一例が挙げられている。

モンテカルロ法が数万回以上の繰り返しの計算を必要とするのと比較して、システムモーメント法は計算量が少ない。また、モンテカルロ法が解析のたび結果にばらつきが生じるのに対して、システムモーメント法では結果のばらつきが生じないという利点がある。ただし、Cox の書籍を見ればわかるように、システムモーメント法の式の導出は複雑で、手計算での解析に向かない。システムモーメント法は、コンピュータに應用されて実用性が上がった。本特集でも、システムモーメント法を採用した公差解析ソフトウェアの解説がされている。

4.4 多次元的な公差解析・CAD との融合

最も単純な公差解析は、板の積み上げのような 1 次元の公差解析であるが、実務では、2 次元の公差解析に対して三角関数などをつかって 1 次元に変換して解析するのが一般的である。たとえば、穴とピンを使った位置決めのがたの解析では、Werst が解析を行っており、著者も別のアプローチで解析を行っている。実務的な公差解析は、この種の計算で事足りることも多い。

一方、Chase らは、DLM (Direct Linearization Method と呼ばれる、行列を用いた 2 次元、または 3 次元の公差解析を提案した。これは、解析寸法を含む開いたループと、すべての部品が組立てられて位置が確定している閉じたループから、解析寸法のばらつきを求める方法である。これも、計算が複雑になるので、コンピュータに應用される。

4.5 幾何公差・ISO GPS との融合

近年、日本でも幾何公差方式で図面を指示しようとする試みが盛んになりつつある。先に紹

介したワーストケースや二乗和平方根などで公差解析を実施する際には、公差をプラスマイナス公差表示方式に変換して公差の累積を表す慣習が長く続いている。幾何公差は公差値で表されるので、その公差値を半分にして±を付加すれば、およそそのまま公差の累積が計算できる。ただし、いくつか、幾何公差特有の公差の累積のさせ方や、母集団を指示する方法があるので、それら以下に要約した。

4.5.1 平面度の公差の累積

平面度の公差は、通常、公差の累積に含まれないが、例外的に公差の累積に含まれる例が Drake や Fischer によって記述されている。

4.5.2 ボーナス公差

サイズ形体に最大実体公差方式 M で幾何公差を適用すると、実際にできた部品のサイズに応じてボーナス公差が生じる。特に姿勢・位置と関連してサイズ形体のすきまばめを設定するには、最大実体公差方式が必要だが、一方でボーナス公差が公差の累積を増やすことになるので、公差の設定方法に注意が必要である。

4.5.3 浮動

幾何公差のデータム参照に最大実体公差方式 M を適用させると、浮動が生じる。浮動は、組立て時に、不良品を救う可能性もある一方で、測定の誤差ともなり得て、公差の累積を増やすことにもなる。公差の累積をなるべく減らすという観点からは、データム参照に M を適用させるべきではない。

4.5.4 図面への母集団の指示

二乗和平方根では、生産された部品の形体が、公差の範囲内に正規分布するなどの前提が必要である。一方、図面の指示は、ある指定の公差の範囲内に入っていれば、要求を満たしたことになる。つまり、従来の指示では、ワーストケースしか成立しないと言っているにも等しい。そこで、ISO 18391:2016 Geometrical product specifications (GPS) – Population specification では、図面に母集団の指示ができるようになった。この指示が行われることによって、はじめて図面の仕様にもとづいた、統計的な公差解析が実施されることになる。

4.6 公差の最適化・品質工学との融合

公差の最適化については、古くからコストとの兼ね合いの研究がなされてきた。加工とコストの関係は、およそ反比例の関係にあることから、公差の最適化をする方法が提案されている。さらに、品質工学と関連して、公差の最適化をまとめたのが、タグチメソッドを使った Cleaving である。

その他にも、遺伝アルゴリズムを公差の最適化に適用した例も提案されて、公差解析ソフトウェアに応用されている。この最適化方法について、本特集で紹介されている公差解析ソフトウェアに含まれているものがある。

4.7 日本の公差解析

日本の公差解析に関わるある程度のまとまった文献で、最古のものは、おそらく 1964 年出版の公差便覧であろう。そして、田口玄一氏の公差のきめ方(1956)、1994 年出版の大滝 英征氏の Oyvind Bjorke の翻訳本と続き、2013 年には、鈴木真人氏・萩原あづみ氏による書籍が出版されている。これらの文献は、それぞれ十数年の時間の間隔があいているせいか、過去からの知識の積み上げというよりも、それぞれの情報が途切れていた。

4.8 公差解析の体系化

公差解析の文献を調べ、分類をして、樹形図のような方法で体系化ができるかと想定していたに対して、図 1 のように、ベン図のような分類と関連を示すのがよいことがわかった。それぞれの分類となる円をなすのは、上で挙げた項目である。それぞれの円は、共通する分野があって一定の関係をもつ。

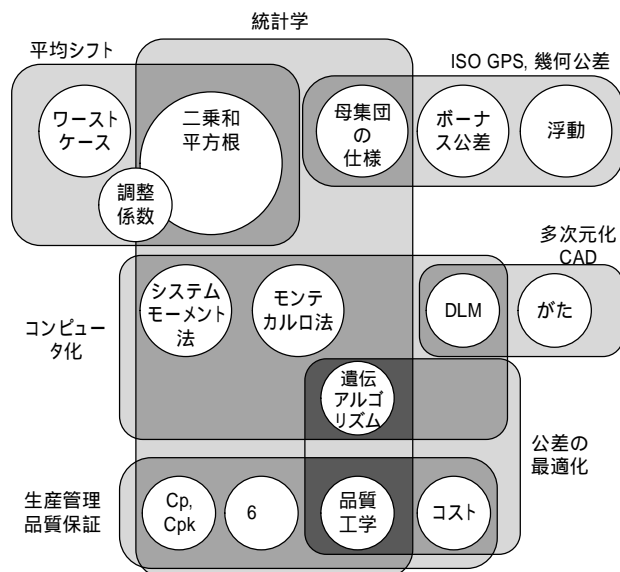


図 1 公差解析に関連する分野

4.9 おわりに

公差解析は、戦後から 20 世紀後半にかけて大きな発展を遂げ、その後もコンピュータとの融合が進んでいる。本報告では、これまで積み上げられてきた過去の文献を整理し、体系化をおこなった。その動機となったのは、先人の知恵をまとめて伝承しなければ、次第に忘れ去られてしまうという問題意識からである。調査の過程で入手しづらい書籍も少なくなかった。

これだけ多くのエンジニアが積み上げた有益な業績を体系的にまとめ上げることができれば、公差解析は一つの学問として成立する。機械工学で例えて言えば、材料力学や、流体工学のように、どの教科書でも必ず記述されている体系化された情報・知識がある。それらの学問のように、公差解析も体系化された情報・知識にまとめあげることができれば、工学の発展に寄与するものとする。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Shinya SUZUKI, Tohru KANADA	4. 巻 92
2. 論文標題 Theoretical Analysis of Assembly Variation by Positioning between Two Parts using a Round Pin and a Diamond Pin	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Procedia CIRP 92 (2020)	6. 最初と最後の頁 75-80
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.procir.2020.05.166	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Shinya SUZUKI and Noboru WAKAYAMA	4. 巻 54
2. 論文標題 Analysis of Assembly Variation between Two Parts Constrained using Hole and Slot Features	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 設計工学	6. 最初と最後の頁 681-696
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14953/jjsde.2019.2844	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 鈴木伸哉, 金田 徹	4. 巻 54
2. 論文標題 2組の穴とボスとを用いた位置決めによる組立ばらつきの解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 設計工学	6. 最初と最後の頁 457-472
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14953/jjsde.2018.2839	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 鈴木 伸哉, 小池 忠男	4. 巻 84
2. 論文標題 最大実体公差方式 解説（前編）機械製図の Mとは何か？	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 精密工学会誌	6. 最初と最後の頁 620-623
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2493/jjspe.84.620	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 鈴木 伸哉, 小池 忠男	4. 巻 84
2. 論文標題 最大実体公差方式 解説 (後編) 機械製図の Mは精密と無縁なのか?	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 精密工学会誌	6. 最初と最後の頁 706-708
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2493/jjspe.84.706	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 鈴木 伸哉, 若山 昇	4. 巻 52
2. 論文標題 穴と長円の穴を用いた位置決めによる組立ばらつきの解析	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 設計工学	6. 最初と最後の頁 553-566
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14953/jjsde.2016.2703	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 鈴木伸哉
2. 発表標題 公差解析の概論とJIS B 0625公差解析用語の紹介
3. 学会等名 日本設計工学会2021年度春季大会研究発表講演会 設計フォーラム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木伸哉, 金田徹
2. 発表標題 2組の穴とボスとを用いた位置決めによる組立ばらつきの解析 (第3報 2つのボスの距離が変化した場合の組立ばらつきの変化)
3. 学会等名 設計工学会
4. 発表年 2019年

1．発表者名 鈴木伸哉， 金田徹
2．発表標題 ボスと穴とを用いた組み立てばらつきの範囲の外接円の式の導出（第2報 2組のボスと穴とによる外接円の性質と定式化）
3．学会等名 設計工学会
4．発表年 2019年

1．発表者名 鈴木伸哉， 栗山晃治， 金田徹
2．発表標題 2組の穴とボスとを用いた位置決めによる組立ばらつきの解析
3．学会等名 日本設計工学会2018年度 春季研究発表講演会
4．発表年 2018年

1．発表者名 鈴木伸哉， 栗山晃治， 金田徹
2．発表標題 2組の穴とボスとを用いた位置決めによる組立ばらつきの解析 第2報 任意の位置での組立てばらつきの式の導出と公差解析への適用
3．学会等名 日本設計工学会2018年度 春季研究発表講演会
4．発表年 2018年

1．発表者名 鈴木伸哉， 栗山晃治， 金田徹
2．発表標題 ボスと穴とを用いた組み立てばらつきの範囲の外接円の式の導出（穴と長円の穴の場合，および2組の穴とボスの場合）
3．学会等名 日本設計工学会2018年度 春季研究発表講演会
4．発表年 2018年

1．発表者名 鈴木伸哉
2．発表標題 アメリカ G D & T 留学記 日本の機械図面を鎖国状態から開国へ
3．学会等名 善光寺バレー研究成果報告会2018（招待講演）
4．発表年 2018年

1．発表者名 鈴木伸哉
2．発表標題 「寸法公差がサイズ公差に変わると何が起こる？」～幾何公差先進国アメリカで学んだ図面にまつわる話～
3．学会等名 広域産学官交流ネットワーク 2018～ マイクロマシニング関連技術 ～（招待講演）
4．発表年 2019年

1．発表者名 鈴木伸哉，若山 昇
2．発表標題 穴と長円の穴を用いた位置決めによる組立ばらつきの解析
3．学会等名 日本設計工学会
4．発表年 2017年

〔図書〕 計4件

1．著者名 鈴木伸哉	4．発行年 2021年
2．出版社 日本設計工学会	5．総ページ数 7
3．書名 設計工学5月号特集 公差解析の文献調査と体系化の試み(JIS B 0625:2021 公差解析用語を用いて)	

1. 著者名 金田徹, 鈴木伸哉ほか	4. 発行年 2021年
2. 出版社 日本規格協会	5. 総ページ数 46
3. 書名 JIS B 0625:2021 公差解析用語	

1. 著者名 鈴木伸哉, 杉山裕一	4. 発行年 2018年
2. 出版社 プラナ 出版	5. 総ページ数 158
3. 書名 公差設計スキル認定試験「3級・4級」対応 公差設計ワークブック	

1. 著者名 鈴木伸哉, 杉山裕一	4. 発行年 2017年
2. 出版社 プラナ 出版	5. 総ページ数 157
3. 書名 公差設計スキル認定試験「3級・4級」対応 公差設計ワークブック	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 16th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing	開催年 2021年～2021年
--	--------------------

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------