

第4章 計測プロセスのパフォーマンス評価と設計

前章までに述べてきた計測システムの評価では、実際に測定を行う測定システムを対象として、その信頼性の評価を行ってきた。それに対して、計測活動全体のパフォーマンス評価の観点から、その合目的性、有効性を如何に確保するかという問題が残る。測定を行う測定プロセスとは区別して、計測の必要が認識され、実際に測定が行われ、目的を達するまでの一連のプロセスを計測プロセスと呼ぶ。この章では、計測の信頼性を確保し、パフォーマンスを上げる立場から、計測プロセスの意図的な組立を進めていくための方法として、「計測プロセス設計」を提案する。さらに、計測プロセスの中で重要である計測特性の検討の例について、プラスチック歯車の簡易計測の例をもとに述べる。また、計測プロセス設計の実際の適用については、次章で述べる。

4.1 計測プロセスとその設計

4.1.1 計測プロセスと測定プロセス

計測の問題が生じ、計測が行われ、問題が解決されまでの計測活動の過程を時系列的に追って整理すると次のようになる。

- ステップⅠ：生産システムの中の問題が、「計測の問題」として認識される。例えば、生産プロセスのある段階で問題があり、それを解決するために、工程の情報を得ようとする。
- ステップⅡ：問題解決のために必要な計測が想定され、「計測の目的」が設定される。
- ステップⅢ：計測の目的から計測内容を具体化する。まず、「目的特性」を決定し、それを知るために「計測特性の選定」を行う。
- ステップⅣ：決められた計測特性を測定する方法が選定される。併せて、目的特性を代表している測定対象が規定される。
- ステップⅤ：計測特性と測定方法が選定された後は、まず、測定器、測定者、装置などの測定システムの内容を明らかにする。
- ステップⅥ：この測定システムにより測定が行われ、測定結果が得られる。
- ステップⅦ：ステップⅣからⅥの測定プロセスの中で、適切な計測方法がないとか、校正のための標準がない、トレーサビリティが取れていない、というような状況があれば、それは管理の問題であり、サポート側の問題として計測プロセスの中で解決される。
- ステップⅧ：測定システムの評価は測定の誤差の大きさによって行われる。
- ステップⅨ：測定の結果は測定の計画の下でのデータとして利用される。データ解析が行われ、一連の測定すなわち実験の結果が得られる。
- ステップⅩ：これが正当に評価され、問題解決のためのアクションが取られるという形で、計測の問題が発生した場面に結果がフィードバックされる。

ステップⅣまでの部分は「計測プロセス」の出発点となる。

計測特性が選定されたステップⅣからで計測結果を得るステップⅥまでの作業的な部分

①計測の目的に照らして、如何に信頼性の高い計測プロセスを実現するか。

②測定方法が決まった段階で、如何に信頼性の高い測定プロセスを実現するか。

それぞれ、計測システムと測定システム的设计に対応し、その内容と方法を規定することにより計測プロセス設計が実現する。

②の測定プロセスの段階では、計測特性・計測方法が決まった後、信頼性の高い測定が可能になるように計測方法とその管理方法、すなわち測定システムを明らかにすることが要求される。ここで、信頼性の指標になるのが、測定の誤差の大きさである。この部分は、前章までに見てきたように、ハードウェアに偏ってはいるが、比較的検討が進んでいる部分である。この段階を「計測設計」と呼び、全体の「計測プロセス設計」と区別する。

①の主要な部分は、問題のある外部とのインターフェイスの部分、すなわち計測プロセスの初めと終わりの段階の問題である。初めの段階では、信頼性の高い「計測」を実現するには「何を如何に測るか」という計測特性と計測方法の選定が行われるが、個別的な検討が中心で、一般的な方法論はあまり検討が進んでいない部分である。また、計測の実行段階では、「如何にデータを集め、何を評価特性とするか」という実験計画と評価指標の選択がキーポイントになる。実験計画の内容と解析については多くの研究が進められているが、計測の中で有効に活用されているとはいえない。また、評価指標という点では、比較的安易に考えられており、測定できたところで安心している部分が多い。

4. 1. 2 計測設計－測定システム的设计

計測特性が決められたことを前提にして、測定システムを構成する要素である、ソフトとハードの二つの面、すなわち、測定方法とその管理方法を含んだ総合的な設計を計測設計と呼ぶ⁴⁻¹⁾。それは、次に示す測定システムの内容を規定することである。

- ・測定システムの規定
 - ・測定方法 (ハードウェア) 測定対象の規定
測定方法・測定器の規定
測定設定条件の規定
測定環境条件の規定
 - ・管理方法 (ソフトウェア) 校正方式 (標準/管理限界/校正間隔)
測定の計画と解析
測定システムの管理
測定手順の管理
- ・測定システムのパフォーマンスの評価
 - 測定の誤差評価
 - システムの最適化

従来の測定システムの研究では、「測定の誤差は使用した計測器の誤差である」としてハード中心に検討が進められてきた。それに対して、その周辺条件、ソフトを含めた測定

システムを規定し、評価の対象として取り上げることを第一に主張する。2、3章で述べてきたように測定システム全体を規定してはじめてその性能である誤差の評価が可能になる。特に、校正方式、管理の内容によって、測定結果の信頼性に大きな差が生じる。その意味で、測定という限定的な用語を使わず、広く計測の立場から測定システムを設計するという意味で「計測設計」という用語を用いる。

測定システムのハードウェア、ソフトウェアが規定された場合、そのパフォーマンスを評価する指標は測定の誤差の大きさである。従来の誤差評価の限界は、ソフトウェアを抜きにして、ハードウェアだけで誤差を評価しようとしたところである。評価対象である測定システムの内容を明らかにすることによって、誤差の内容が明らかになる。最終的に、測定の誤差の大きさが要求精度を満足しているかどうかによって、その測定システムの採否が決められる。したがって、計測設計の方法としては、次の2つがある。

- ①測定の誤差評価：測定の誤差をいかに評価するか。
- ②システムの最適化：誤差の小さい測定システムをいかに実現するか。

測定の信頼性を向上させるための計測設計の方法論として、4. 2節で述べるように計測の機能に着目し、機能性の評価と改善の方法を提起している品質工学の考え方を活用する。

①の誤差評価の方法については、2章に述べたように、SN比の方法を用いる。SN比の方法は、「JIS Z9090 測定—校正方法通則」の中にも採用されており、測定を実際に行うための測定システムを最適化する基礎となる、測定の誤差の大きさの評価方法を与えている。

②の誤差の改善を行うための方法として、SN比によるばらつきの大きさの評価をベースにしてシステムの最適化設計を実現する、品質工学のパラメータ（ロバスト）設計⁴⁻²⁾、許容差設計を適用する。計測の誤差の場合も、かたよりは校正によりなくすることができるが、ばらつきにはその補正の手段がなく、それを最小にしておくことがシステムの設計の第一歩である。

測定システムには必ず何等かの変動が発生し、測定の誤差となるが、それを小さく抑えることができるのは測定システムの設計変更か、校正かのいずれかである。従来、測定の高精度化は測定の環境条件を整備することによって実現してきたが、そのままでは現場では使えない場合がほとんどである。メーカーは良い計測器を設計し、ユーザに供給するのが任務であり、ユーザは、それを使って校正を含めて計測器の正しい使用と管理、すなわち測定システムの設計・運用を行うことになる。測定システムのパフォーマンスを確保する責任は、あくまでも計測を行うユーザの側にある⁴⁻³⁾。また、ユーザはその責任を果たすために、メーカーに良い測定器を製造することを要求するか、自分で良い測定器を開発することになる。

4. 1. 3 計測プロセス設計

パフォーマンスの高い計測を実現するために、一連の計測プロセスを組み立てる活動を「計測プロセス設計」と呼んだ。前に述べた計測のプロセスと測定のプロセスの構造から、計測プロセス設計の内容は次のように規定される。

- ①計測特性の選定
- ②測定方法の選定
- ③計測設計：測定システムの規定
- ④測定の計画の策定
- ⑤データの解析と結果の評価
- ⑥目的の実現：対策の選定

大きく括れば、計測の計画と結果の活用である。

①の何を測定したらよいかという計測特性の選択の問題は、計測のパフォーマンス確保の上では重要であるが、個々のケース、技術内容などによるところが大きく、一般的な解法はまだ見いだされていない。目的特性と相関の高い特性を選ぶことが一般には言われている。次項で硬さの例を検討するとともに、4.3 節でプラスチック歯車のかみあい試験で得られる特性について検討した例を示す。

②の測定方法の選定では、主として測定の精度と要求精度との比較が行われている。最終的には、③の計測設計の結果として比較・確認が行われるが、この段階では経験的な数値が利用される。また、破壊測定か非破壊測定かなどの制約条件や経済条件なども考慮される。基本的には、現場で必要とされる条件と計測方法が持つ条件の比較の問題で、データベースの利用やスコア付けなどの方法が用いられる。適切な測定方法がない場合には、測定方法の開発が必要になる。ここの部分の体系的な組立ができれば、計測の活用は容易になっていくが、現状では、①も②も、熟練者の経験に基づいた判断による部分が大きく、計測の重要なノウハウとなっている。

③の計測設計については前項で述べた。

④と⑤は対応している部分も多く、この部分を実現するためには、実験計画法、それに対応した分散分析や予測などの方法が使われる。この部分の方法は、計測における統計的方法として研究されている。しかし、従来、実験の組立は計測プロセスの一部として認識されてこなかったため、計測プロセスの中で十分に活用されているとはいえない。しかし、計測の目的を実現するというパフォーマンスの観点からは、どのような空間でデータを集めるかを規定する測定計画は計測プロセスの中で、計測特性の選択に次いで重要なステップである。

4. 1. 4 試験法開発における計測プロセス設計 — 硬さ試験の開発の場合

計測プロセス設計の内容を、材料試験の一つである硬さ試験の開発の場合を想定し、検討する⁴⁻⁴⁾。この部分は、メインのプロセスというよりは、支援プロセスの部分である。

材料の強度試験を例にした場合、試験（測定）の目的は材料強度評価という意味である程度明確である。どのような強度を評価したいかで試験法が選択される。試験片を作成してオフライン的に試験する場合には引張試験やシャルピー衝撃試験などが行われるし、オンライン的に工程内で試験する場合には、準非破壊試験である硬さ試験などが選ばれる。

強度試験方法の正しさを調べ、校正を行うためには標準が必要であり、また、現場の強度試験機を校正するためには、標準試験片の開発が不可欠である。しかし、破壊試験であ

る強度試験の場合、同じ試験片を何回も測定することはできないため、標準試験片の開発は難しく、他の測定方法に比べ遅れている。

強度試験方法及び標準試験片の開発を通して、硬さ試験を確立するという一連の研究プログラムの場合について、仮想的に計測プロセス設計の考え方をあてはめる。計測法確立のために必要な事項を整理すると、次のようになる。

- ① 測定量の定義
- ② 量の定義を実現する試験システムの選択
- ③ 標準試験片の製作技術の開発
- ④ 試験機と試験条件の設計
- ⑤ 標準の設定
- ⑥ 試験法の管理方法の整備

①は測定する量の定義を明確にするという最初の段階で、計測の目的にそってどのような種類の硬さ値を測るかという試験法を決める問題に対応する。ここでは、ロックウェルCスケール硬さ試験を選んだと仮定する。ロックウェル硬さ値は、頂角120度のダイヤモンド圧子に試験荷重150kgfをかけて押し込んだときの押し込み深さを h (μm)としたとき、

$$\text{HR}=100-(h/2)$$

(4.1.1)

と定義されている。直接測定される量は押し込み深さ (μm) であり、試験機としてはこれを硬さ値 (HRC) に変換して表示する。

②は試験方法をハードウェアの測定システムとして規定することである。硬さ試験機の試作の場合、定義を実現する硬さ試験機をハードウェアとして実現する段階である。例えば、荷重負荷方式について、デッドウェイト式、油圧式、サーボ式のいずれを取るかなどを選択するシステム設計の段階である。市販品を選ぶ場合であれば、型式の選択になる。

③では、測定量の基準となる硬さ試験片を製作するための製造技術の開発が行われる。次の④の段階で試験方法の最適化や正しさを求めるためには、標準試験片が必要である。硬さ試験においては、目的特性である強度の違いを実現する標準強度試験片を製作するための技術としては熱処理技術の開発が中心になる。標準試験片は、安定で再現性が高い物であること、さらに、試験片の値に意図的に差を作ることが要求される。試験片の値の差は製造条件を変化させることにより実現できるような計画を組む。

④では、測定システムとして選定した具体的な試験方法を、ハードウェアとしては安定した試験機として、また、ソフトウェアとしては普遍性の高い強度値を実現する試験条件の設定として実現する。硬さ試験の場合、試験方法として荷重付加パターンなどの試験条件は定義されておらず任意性があるが、現実にはこれらの条件を決めなければ試験法として完結しない。これらについて試験の機能性の立場から条件設定する。その際、③の段階で作られた安定した基準片を用いて、再現性、安定性、比例性の立場から条件設定を行う。また、この段階で、試験機を構成する条件や要素の仕様の単位と、求めたい強度の単位とは異なることから、試験機の各要素の誤差を硬さの誤差に変換するために、影響の大きさを表現する比例係数を見積もることが必要となる。

⑤では、標準を決める。量の定義が完全であれば、それを忠実に実現する装置により標準を実現できる。硬さ試験の場合、標準試験機を標準とする。標準試験機により試験片の絶対値を決定する。この試験片も標準物質として標準になり得る。しかし、試験片はその使用範囲に限度があり、スケールを内部に持つ試験機を標準とすることにより、より一般的なシステムを構成することができる。どちらを基準として用いるかは、その時点での技術力による。標準値を実現するもの（標準試験機）の経時的、あるいは環境的な安定性についても評価する。

⑥では、開発された試験法を高精度で維持していくための管理方法を設定する。その中には、試験機と試験片による測定システムの管理と校正方式が含まれる。特に、一次標準である国の標準試験機の場合、それがトレーサビリティのトップにあることから、標準試験機の変化を他の試験機により校正するというわけにはいかない。そのため、試験機の要素の管理を中心に、試験片で管理状態を確認するという管理システムを取ることが必要である。

これら一連の活動は、従来、個別に検討されることが多かったが、試験技術の性能をより向上させトレーサビリティ体系として確立させていくためには、計測システムとして捉えた総合的な計測プロセス設計の立場からの研究が必要となる。

このような計測法及び標準の確立は、計量研究所の様な標準研究所だけで必要なのではなく、実物標準など生産現場で本当に使える標準と測定システムを確立するためには、どこでも必要になる技術である。特に、現場で使えるという意味では、それぞれの生産現場での計測の問題でもある。

4. 2 生産システムにおける計測のパフォーマンス

4. 2. 1 生産システムにおける計測のパフォーマンス

生産システムにおける計測と計測プロセス設計を、計測のパフォーマンスの立場から明らかにする。すなわち、計測を生産システムの中での活動の目的に照らして検討し、計測のパフォーマンスを向上させるための方向を明らかにする。

製品の生産システムにおいて、あらゆる活動は、“品質の良い製品”を作り出すために行われる。その中で、計測は、工程がどのような製品を作り出しているかを評価するための活動であり、アクションの基になる情報を生産しているという意味で、品質管理の基礎であるといわれてきた。例えば、「検査計測」「計測制御」ということばに象徴されるように、計測ということばは単独に使われるよりは、その目的とする意図と強く結び付けられてきた。すなわち、計測は検査と同等にみられることが多く、制御のための計測と位置づけられていることが多かった。このように計測が計測単独として存在することが難しい状況は、むしろ計測関係者以外の部分で強く認識されており、逆に、計測関係者の中ではそのような意識は希薄であったというのが現実である。

従来の計測あるいは計量管理が単に測定値を出すだけという形で、生産システムの大きな目的に対して間接的なままに終わる場合が多かったが、積極的に、生産システムにおける計測の役割を規定して、目的に対する寄与の大きさを主張していくことが必要である。生産システムにおいて、“評価→対策→アクション”という流れの中で、計測によりどれだけの評価が可能になり、アクションが可能になったか、また、それを通してどれだけ製品の品質が向上したかによって、計測のパフォーマンスが決まる。

4. 2. 2 生産システムにおける計測の歴史

生産システムにおける計測の歴史は品質管理の歴史と表裏一体であったといえる。工程における計測は検査から始まった。工業化・大量生産が始まった初期の段階（第一段階）では、生産工程の工程能力がなくばらつきが大きいいため、作った製品を測定し、良品、不良品に選別する検査が、市場に不良品を出荷しない唯一の手段であった。このような状態は現在でも見られる。例えば、半導体産業において、生産技術が未熟な初期の時点では最終的な製品の保証は検査に頼らざるを得なかった。

生産技術が向上し、工程能力が上がり、製品のばらつきが小さくなるにつれて、第二段階として、シューハートに代表されるような統計的管理図手法が使われるようになった。管理図法は、工程のばらつきを監視することによって工程の異常を検出するためのシステムであり、現在でも多くの製造業で利用されている。そこでの計測の役割は、工程の出力である製品の特性の測定であり、検査と基本的には同じである。ただ、計測結果に基づくアクションの対象が、検査の場合には個々の製品であったのに対し、管理図法ではこれから生産される製品であり、工程そのものである点で検査とは異なる。管理図法では、統計的管理状態からはずれた場合には工程を止め、原因を追求し直すということが中心で、現実には生じた工程の大きな変動に対して対処することはできるが、許容限界内での製品のばらつきを減らすという工程の改善にはつながりにくい。

工程を改善するという観点から、第三段階として、工程で品質を作り込むという形での品質管理運動が展開された。QCサークルや“KAIZEN”など、日本的な品質管理活動が

世界的な注目を浴びた。ここでは、原因系の調査のために多くの計測が導入され、工程のばらつき原因を丹念につぶしていくという活動が活発に行われた。また、この段階で工程内計測が多く出現しているが、その多くは、製品を作る過程における条件管理のための計測が中心であり、いろいろな工程条件がある決められた統計的管理状態にあることを監視するという、検査的な考えのもとにおかれたものが中心であった。

第四段階では、工程を制御するために工程内での計測（オンライン計測という）が行われ、その結果によって工程の制御が行われる。現在の多くの生産システムはこの計測・制御システムを前提に組み立てられている。オンライン計測によって工程の状態を正しく把握し、これから作られる製品に対するアクションが正しく行われるならば、工程の最後において個々の製品を検査する必要はなくなり、製品の監査的な計測が残される。しかし、計測設計の立場からみれば、工程内での動的なプロセスを含む対象に対する計測の正しさを確保するための方策は必ずしも十分とはいえない。

さらに、第五段階として、品質工学が提起しているように、より源流である設計段階での技術によって品質を確保する段階に入っている。ここでは、製品や工程の設計において、ノイズの存在のもとで製品の機能や工程の機能がばらつかないような最適化設計を行うことをめざしている。従来の品質管理がその対象を量産段階での生産工程の中での対策を考えてきたが、量産にはいる前の検討が重要であることが提起され、開発設計における計測（オフライン計測という）の重要性が強調されている。

このような歴史的側面を見ても、品質の基になるデータを作り出す計測の重要性は一般的には強調されてきている。しかし、それは情報としての重要性であり、計測が直接に製品を生み出すわけではない。情報をどう活かすか、活かさないかは、情報を生産した計測部門の手を離れていたのが現実である。また、製品が不完全であったり、クレームになったようなときに、トラブルの原因追求の手段として計測が利用されるという場面も多くみられる。その意味で、計測は余計なものであり、なければい方がよいという考えもまた一般的である。オフライン計測に基づいた工程の設計段階がうまく機能すれば、工程内のオンライン計測は簡単なものでよく、工程での計測や検査は省略可能である。これからの計測は、製品や工程の設計段階で新たな価値を生み出すための計測が中心になると考えられる。

4. 2. 3 品質の評価と改善 - 品質工学の活用

生産システムにおけるキーワードである「品質」は、「品物又はサービスが、使用目的を満たしているかどうかを決定するための評価の対象となる固有の性質・性能の全体」(品質管理用語：JIS Z8101)と定義されているが、それを具体的にどう定量化するかについては、多くの議論が行われている。大きく分けると、使用者側からの定義、生産者側からの定義、また、それを融合させたものが上げられるが、ここでは、田口により開発された品質工学における品質の定義を援用する⁴⁻⁵⁾。

田口は「品質とは、製品が出荷後、社会に与える損失である。ただし、機能そのものによる損失は除く。」と定義している。ここで、損失の中には、機能を満たさないことによる、予定の効用を満足しないためのユーザの損失、あるいは、予定の効用を満たすために使われる予定外の支出などを含む。すなわち、社会に与える損失を、ユーザに依存する製

品の機能による効用そのものではなく、個々の製品によって異なる機能のばらつきによって製品に期待された効用を満たさないことによるユーザの損失を、金額の形で定量化しようとしている。このような定義を用いることによって、品質評価に、技術評価としての客観性をもたせることが可能となる。

具体的には、このような損失は、個々の製品の機能のばらつきによって生じ、製品の機能特性 y の目標値（設計値） m からの差の2乗平均（誤差分散の大きさ）に比例するという損失関数として、定量的に表現される。式で表せば、個々の製品に対しては、

$$L = k (y - m)^2 \quad (4.2.1)$$

であり、標準偏差 σ のばらつきを持つ製品群に対しては、個々の製品の偏差の2乗 $(y - m)^2$ は製品群の分散 σ^2 に置き換えることができ、

$$L = k \sigma^2 \quad (4.2.2)$$

となる。ただし、係数 k は、製品が許容差 Δ を超えたときの損失の大きさ A により、次のように決めることができる。

$$k = A / \Delta^2 \quad (4.2.3)$$

また、計測に誤差がある場合、その誤差は目標値からの差として評価されることから、測定誤差の大きさを分散 σ_m^2 で表せば、測定の誤差による損失は

$$L = k \sigma_m^2 \quad (4.2.4)$$

で表される。すなわち、損失関数は測定の対象である製品に依存する。

このような損失関数の立場からは、目標値すなわち設計値からの偏差の小さい製品が、ばらつきが小さく、品質の高い製品である。このような製品を製造するための、生産システムの管理の問題としては、

- ① 製品の平均値を目標値（設計値）に合わせる。
- ② 製造のばらつきそのものを小さくする。

の二つの課題になる。これは、計測におけるかたよりとばらつきの問題と同じであり、計測プロセスと工程とを相似的に検討することが可能である。4. 1. 2項の計測設計の課題と対応する。

ここで、①は平均値の校正あるいはチューニングの問題である。比較的研究も進んでおり、工程の時間的な変動を検出し、予測に基づく修正を「工程の校正」として実現するオンライン管理の問題として解決することが可能である。基本的には、計測のかたよりを修正するための校正の考え方は工程の校正においても有効である¹⁻⁶⁾。オンラインでの工程

の構成の問題については第5章で検討する。

一方、②はばらつきの改善の問題である。ばらつきのうち、工程の長時間の変動は一定時間間隔での校正によって修正されるとしても、その時間間隔内のばらつきを小さくすることが問題の中心である。従来、ばらつきの問題は扱いが難しく、余り研究が行われてこなかった。田口がSN比の方法を用いたパラメータ設計の方法を提起して以来、ばらつきをいかに減らすかというロバストネスの改善の問題が生産システムの中で重要視されるようになった。

このように、①の校正の問題はオンラインの管理システムの問題として、また、②のロバストネスの改善の問題はオフラインの設計の問題として解決していくことができる。

ここで、オンライン、オフラインを次のように考えている。

オフライン： 生産準備 →製品・工程の設計

オンライン： 製造段階 →工程・製品の制御

生産システムの流れを、生産準備段階のオフラインと製造段階のオンラインとに大きく区分する。オフラインの部分は、製品の設計、工程の設計（生産技術）などにおいて、多くのばらつき原因に対する対策が設計問題として行われる。オンラインの部分は量産段階で、製造のばらつきを制御するために、量産工程の管理システムを最適に設計する。

品質工学では、製品や工程などのシステムの設計段階を次の4つの段階にわけるとを提案している。

- ①システム選択
- ②パラメータ設計
- ③許容差設計
- ④許容差の決定

システム選択においては、製品や工程の機能を発揮させるようなシステムの構成要素の組み合わせを決めるものである。基本的には、物理現象を基に、目的とする機能を実現する製品や工程を実現する段階である。このような機能を実現するシステムにばらつきを検出して修正するシステムを付加するかどうかを決めるのもシステム選択の一つであるが、修正システムはあくまでも付加機構であり、主システムの設計の最終段階で行われることが多い。

パラメータ設計はシステムの構成要素の定数を決める段階であり、許容差設計は、それら定数の許容差を決める段階である。システム設計は対象システムの固有技術者により行われるが、パラメータ設計、許容差設計は品質工学の対象である。すなわち、安定性設計の立場からシステムの出力にノイズが影響しないような設計定数を選択すること、及び、システムの出力に影響するノイズの許容される範囲を決めることによって、ばらつきの少ないシステムを作り上げる共通の方法論が提起されている。パラメータ設計は、製品のばらつきが小さくなる条件の組合せを求めるとの、実験計画法を用いた最適化の方法である。ばらつきの原因系を追求し、取り除くという対策に対し、最適成形条件の値を設定す

ることによってばらつきの小さいシステムを実現するという対策は、特別のコストがかからない方法である。

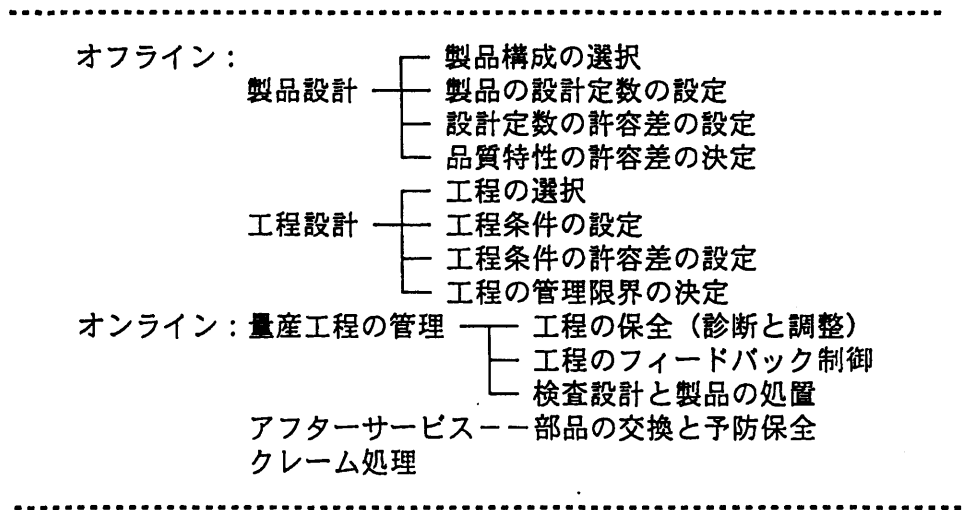
パラメータ設計だけで十分製品のばらつきが小さくならない場合には、許容差設計により、ばらつきの原因となる条件の変化の幅を小さくする。一方、パラメータ設計によって十分ばらつきの小さいシステムが実現した場合には、許容差を広げることによりコストの削減を図ることができる。最終的には、許容差の決定の段階で、損失関数により表現される品質とコストとのバランスを取り、許容差を決める。このことにより製品あるいは工程の仕様が決まり、品質水準が決まる。

4. 2. 4 品質設計システム

生産システムの中でこれら設計活動を有効に働かせるシステムとして、品質設計システムを提案する。品質設計システムは、「量産の初期から品質の高い製品を生産できる」という目的を持つシステムである。従来、品質問題は製造過程の結果として生じると考えられてきたのに対し、意図的に品質を設計し、設計通りの品質（ばらつき）を実現しようという考え方である。

品質設計システムによる生産の過程をまとめると表 4.2.1 のようになる。製品設計、工程設計の中は、システム選択、パラメータ設計、許容差設計、許容差の決定の各段階に対応し、実験の方法などは共通の方法がとられる。実験の制御因子は共通して対象システム、すなわち、製品や工程の構成要素が取り上げられるが、誤差因子のとり方は、製品設計においてはユーザ段階での使用環境条件や劣化の条件がとられ、工程設計においては量産時の工程の変動条件がとられる点で異なる。

表 4.2.1 品質設計システムによる生産の過程



品質設計システムの中で、その基本を計測設計と品質工学に基づく評価と最適化において。計測の側から見れば、生産システムの目的である品質の設計のために計測が寄与できるものを明らかにするためのシステムであるということができる。

オンライン管理の設計では、工程の管理システムの最適化が行われる。最適化の基準と

しては、総損失すなわちコストと製品のばらつきによる損失の和を最小にする。管理の内容としては、工程のフィードバック制御、オンライン計測器の校正システム、工程の異常を対象にした工程の診断と調整、さらに、検査設計などがある。

オンライン計測に関わりが深い問題としては、量産時に、製品のオンライン計測に基づいて行われる工程の予測・制御のフィードバック制御である。パラメータ設計によって、ばらつきが小さくなり、目標値からのかたよりが小さくなる条件が見つけれられ、その下で量産が行われているが、実際には、環境条件や考慮されていなかった条件によって工程が変動し、結果として製品のばらつきが大きくなる可能性がある。このようなかたよりを修正するために、成形直後の成形品を直接計測し、目標値に合わせるように制御する。実際の予測・制御はオンライン（量産段階）で行われるが、そのための最適な条件設定は量産開始前の品質設計システムにおいて検討される。

一方、オンライン計測が行われるようになると、生産設備（加工機）と計測器は一体として設備されるようになり、その区別がつかなくなってきている。さらに、多くの場合全体を機能させるためにマイクロプロセッサやチップが組み込まれている。そのような場合に、全体としての機能を一つのシステムとしてみることが多い。すなわち、途中はブラックボックスとしても、加工の意志を信号因子として入力したときの出力を見る事によって評価が可能である。しかし、いくつかの基本要素の機能部分に分解して個々のシステムとしてみることも可能で、計測サブシステムや加工サブシステムなど機能の規定の仕方によって評価の方法が異なってくる。

オフライン計測の中では、製品設計、工程設計の中でどのような計測プロセスを取るべきかが中心的な問題である。

まず第一に、製品や工程の技術開発のための計測として機能の計測を如何に実現するかという問題がある。一般に、製品の品質を証明するための計測は、製品や工程の仕様に決められた特性を測定し、評価することが求められる。それに対し、仕様を決める設計の段階では、必ずしも仕様にこだわる必要はない。何を計測特性に選んでも良い。品質工学では製品や工程の機能を測定し、その機能性を評価すべきであることを提案している。計測プロセス設計の立場からこれを定式化するならば、計測特性を製品や工程の機能から決めるべきであるということになる。製品や工程の機能は本質的に動的な機能であり、信号因子の値と目的特性の値の対応性、再現性、安定性が問題になる。これらは、動的機能のSN比によって評価が可能である。いろいろな製品や工程の評価の試みが実験的になされており、部分的に成功を収めているが、機能と計測特性を決める方法は定式化されていない。

第二に、どのような形の測定の計画を採るかという問題がある。この問題に関しては、設計問題をパラメータ設計と許容差設計の組合わせとして定式化しており、品質設計システムでは明確にされている。すなわち、SN比による評価を前提に、パラメータ設計あるいは許容差設計の実験計画に従った因子の選定が可能である。因子としては、制御因子、誤差因子、信号因子の選定が必要である。いずれも、具体的な因子の選定は対象技術によるが、実験計画という観点での方法は明確である。

4. 3 計測特性の検討の試み

二歯面かみあい試験によるプラスチック射出成形歯車の評価

4. 1 節において、計測の信頼性を確保していくための計測プロセス設計を、測定を行う測定システムを設計する立場と計測活動全体を管理する立場とから検討した。計測特性が決められた上で測定を実際に行う測定システムに関わる研究は進んでおり、その信頼性を評価し、向上させていく方法は明確にされていると考えられる。一方、何を計測したらよいかという計測特性の選択の問題は、計測の信頼性の確保の上では重要であるが、個々のケース、技術内容などによるところが大きく、まだ一般的な解法は見いだされていない。

計測によって得られる特性が意味するものを明らかにする1つの試みとして、プラスチック射出成形歯車の評価の問題を取り上げた。

4. 3. 1 実験の目的

プラスチック成形歯車は、キャビティ内に樹脂を射出成形することにより作られるため、切削加工による歯車とは誤差の現れ方が異なっている。一般的には、成形時の収縮を予測してキャビティを設計し、電鋳加工や放電加工により金型の中の個々のキャビティを加工する。更に、ある成形条件の下で、キャビティ内に樹脂を射出することにより製品としての歯車が作られる。したがって成形されたプラスチック歯車には、キャビティ設計とは別に、個々のキャビティの加工による変動、成形条件の違いによる変動が現れ、歯車としての誤差の状態は複雑に変化していると考えられる。また、材質が軟らかく、ある程度の形状誤差があったとしても、機能的には支障のない場合もあるため、幾何学的な形状の測定だけでなく、かみあい試験等による機能的な測定も必要である。

更に、成形加工の特質から、加工条件へのフィードバックを行うために、加工された多数の歯車の良否を短時間で判定しなければならない。一歯面かみあい試験は測定及びその評価が難しく、試験機も高価であるなどの理由があり、二歯面かみあい試験が広く歯車成形現場において使われている。最近、成形歯車の加工精度に対する要求が厳しくなっており、歯車としての誤差の測定方法を改善していく必要が増大している。

金属歯車の場合、個別誤差がかみあい試験においてどのように検出されるか、加工工程の問題も含めて研究は進んでいる⁴⁻⁷⁾が、プラスチック成形歯車の場合、加工工程が複雑であり、樹脂の収縮に異方性があると考えられるなどの特殊性があり、十分に検討されているとは言えない。いろいろな条件の下で変化する誤差の状態をとらえるためには、実際に起こり得る条件の下で成形された歯車の個別誤差とかみあい試験の結果について統計的評価方法を利用して検討する必要がある。

本節では、成形加工の改善を目的とした二歯面かみあい試験による成形歯車の評価方法を検討するために次のことを行った。同一金型から成形された歯車について二歯面かみあい試験により得られた波形記録より、フーリエ振幅、各種の誤差分散等の特性値を波形特性として得た。次に、個別誤差の測定値から形状特性を表す特性値を求めた。両者の特性値の関連から、かみあい試験により得られる情報の内容と有効性を明らかにした。

計測プロセス設計の立場から言えば、歯車の現実的な測定方法である二歯面噛み合い試験の結果得られる特性を検討し、測定で得られる情報を整理した事例である。このような方法は計測特性の選択の方法として適用可能である。

4. 3. 2 実験の方法

増沢ら⁴⁻⁸⁾はプラスチック製(成形及び切削)歯車について、個別誤差と二歯面かみあい誤差の測定を行い、重回帰分析により両者の結果を解析しているが、ここではプラスチック製歯車全般を母集団としている。しかし、成形加工工程の改善を目的とした歯車の評価方法を検討するためには、同一の金型から成形加工された歯車を母集団として選ぶことが現実的である。したがって、ここでは6個取りの金型から、成形条件を変化させて加工された歯車を、検討対象となる試験歯車とした実験を行った。

表 4.3.1 歯車の諸元と成形条件

歯車の諸元		成形条件		
歯車の種類	平歯車	金型温度 T	T_1 60 °C T_2 75 °C T_3 90 °C	
歯形	インポリュート	溶融樹脂温度		195 °C
モジュール	0.5	型締力		25t
基準圧力角	20 °	射出圧力	560 kgf/cm ²	
バックラッシュ	0	サイクル時間	36s	
歯数	48	キャビティ	6個	
転位係数	0		フィルムゲート1個 2点ピンゲート5個	
歯幅	3 mm			
J I S 精度等級	7級			
材質	ポリアセタール			

試験歯車の諸元及び成形条件は表 4.3.1 の通りである。材料のポリアセタールはプラスチックとしては強度が強く機械部品として広く使用されている。成形加工の中で成形条件のうち金型温度の影響が大きいことが分かっている⁴⁻⁹⁾ので、金型温度を加工上の影響因子として選んだ。温度の水準は標準的な条件とその前後の3水準に変化させた。その他の条件は標準的なものを選んだ。金型の中に埋め込まれた6個のキャビティのうち、一つは軸穴の縁から樹脂を射出するフィルムゲートかキャビティであり、他の5つは、軸穴と歯先の間際の2か所から樹脂を射出する2点ピンゲートのキャビティである。各キャビティは電鋳加工により作られたものである。また、金型温度3水準それぞれで、連続した2回のショットで得られた歯車、計36個を実験に使用した。

まず、金属製基準歯車を用いた二歯面かみあい試験を行った。二歯面かみあい試験のブロックダイアグラムは図 4.3.1 の通りである。基準歯車に対し約 0.57N(60gf)の押付力で試験歯車を押付け、基準歯車側を駆動側として回転させた時の軸間距離の変動をかみあい波形として記録した。基準歯車の回転角及び軸間距離の変動は、電気マイクロメータによって検出し、アンプを通し、A-D変換した後、計算機に同時記録した。基準歯車の回転速度は 3/2rpm としたが、回転速度によるかみあい波形の変動は小さい。サンプリング時間は1歯のかみあいにつき 20 データとれるように設定し、試験歯車の4回転分の記録をした。

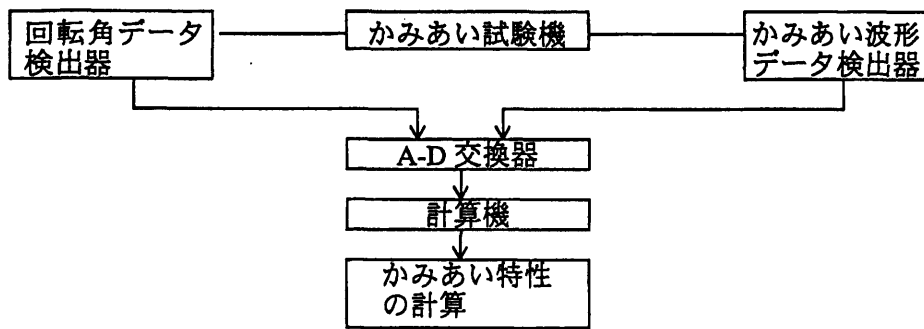


図 4.3.1 かみあい試験のダイアグラム

かみあい波形のデータから、次節で詳しく述べる波形特性、寸法特性を計算により求め、かみあい試験により得られる特性値と考えた。これらをかみあい特性と呼ぶ。

一方、同じ歯車について歯みぞのふれ、各種ピッチ誤差、歯形誤差、圧力角誤差の形状誤差の測定を行った。測定データより、形状を表す値を計算により求めた。これらを形状特性と呼ぶ。

更に、かみあい試験により得られる特性値の意味を明らかにするために、形状特性を含めて因子分析を行い、両者の対応関係を調べた。

4. 3. 3 かみあい特性

図 4.3.2 は二歯面かみあい試験により得られたかみあい波形の一例である。全体的な特徴として、フィルムゲートキャピティにより成形された歯車に比べ、ピンゲートキャピティにより成形された歯車のかみあい波形は複雑で高次のフーリエ成分が大きいと考えられる。かみあい波形のデータをもとに、次のようなかみあい試験により得られる特性値を求めた。

ピンゲート、金型温度 90℃、樹脂温度 195℃



フィルムゲート、金型温度 90℃、樹脂温度 195℃



図 4.3.2 かみあい波形の例

かみあい波形の、試験歯車1回転を基本周期 T_0 としたフーリエ1次成分及び2次高調波成分を求め、それぞれ1次振幅、2次振幅と呼ぶ。かみあい波形のデータを $x(t)$ とおけば、 i 次振幅 α_i は

$$\alpha_i = \int_0^{4T_0} x(t) \sin\left(\frac{2\pi i}{T_0} t\right) dt \quad (i=1,2)$$

となる。

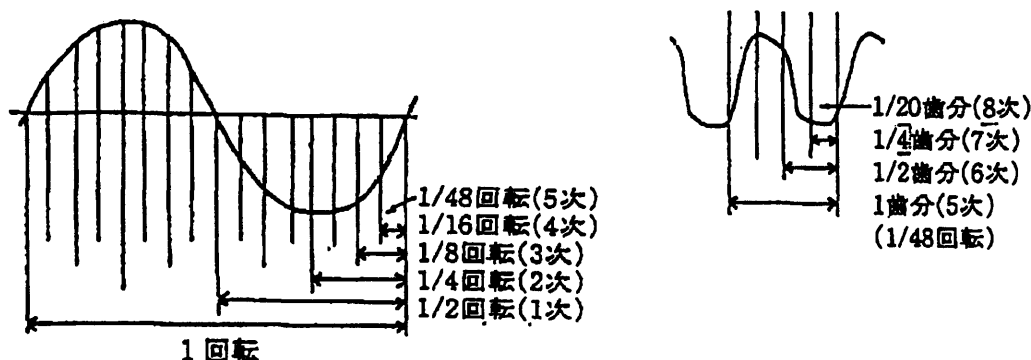


図 4.3.3 かみあい波形の分割

また、基本周期の正弦波の位相分だけずらし、総平均値のレベルを出発点とするデータに変換し、図 4.3.3 のように8次単位までの分割を行った、4回転分の波形は繰返しとして扱い、便宜的に9次分割単位と呼ぶ。各分割単位 j 内の変動 S_{ej} は、

$$S_{ej} = S_{Tj} - S_{Tj-1} \quad (j=1,9)$$

但し、

$$S_{Tj} = \frac{\sum_k \left(\sum_{i \in k} x_i \right)^2}{n_j} \quad (j=1,9)$$

である。ここで x_i はかみあい波形のデータ、 n_j は j 次分割単位に含まれるデータ数、 $i \in k$ は j 次分割単位の k 番目の単位に含まれるデータについて和をとることを意味している。また

$$S_{T0} = \frac{\left(\sum_i x_i \right)^2}{N}$$

とする。 N はデータの総数である、

表 4.3.2 かみあい波形の分散分析表の例 (μm^2)

要因	変動	自由度	分散	$\Sigma \sigma_i^2$
1次誤差	724 806.0	1	724 806.0	454.74
2次誤差	120.4	2	60.2	77.27
3次誤差	191 263.9	4	47 816.0	77.27
4次誤差	63 184.2	8	7 898.0	44.05
5次誤差	16 092.7	32	502.9	13.23
6次誤差	9 589.5	48	199.8	9.44
7次誤差	8 863.6	96	92.3	6.76
8次誤差	4 883.0	768	6.4	2.46
9次誤差 (繰返し)	3 339.4	2 880	1.2	1.16

$\Sigma \sigma_i^2$ は、高次の i 次純分散成分の和である。

このような計算は、基本的には枝分かれ配置の分散分析と同等である。分散分析表の一例を表 4.3.2 に示す。各分割単位での分散の期待値から、各分割での純分散成分を求め、それと高次の純分散成分 σ_i^2 をプールして、誤差分散 $\sum_{j \geq i} \sigma_j^2$ を計算する。 $\sum_{j \geq i} \sigma_j^2$ について、

次の対数変換を行う。

$$\eta_i = 10 \log \frac{1}{\sum_{j \geq i} \sigma_j^2}$$

このような SN 比の形に変換して、かみあい特性値とし、1次～8次誤差と呼ぶ。9次誤差はかみあい試験の繰返し誤差となっている。ほとんどの歯車において、2次誤差、5次誤差は高次の誤差に対して有意にならず、他の誤差はほぼ有意となった。

かみあい波形は歯車のかみあいの誤差そのものであるが、その総平均値は歯車のピッチ円の大きさを反映したかみあいの位置の変化を表している。かみあい波形の総平均値をピッチ円の大きさを表す寸法特性値と考える。今回の実験では、個々の歯車のかみあい位置の絶対値が必要なのではなく、成形条件等の変化による相対的な変動のみが問題である。また、押付力を変化させたところ、0.57N (60gf) 付近では、かみあい波形の総平均値の変化は小さく、押付力が一定しないことによる影響は小さいことが分かった。

また、日本歯車工業会規格 (JGMA)⁽⁴⁻¹⁰⁾ との対応をみるために、1ピッチかみあい誤差及び全かみあい誤差も波形特性値とした。1ピッチかみあい誤差は、すべての1ピッチかみあい誤差の2乗平均値を代表値とした。

4. 3. 4 形状特性の測定

歯車の精度を表す形状誤差については JIS⁽⁴⁻¹¹⁾ に規定されているが、その中で、試験歯車の形状特性として、次のものを選んだ。いずれの測定においても、プラスチックの特性を考え、低測定力の測定を行った。

- (1) 各種ピッチ誤差： 万能測定顕微鏡を用い、円ピッチ角度測定法により測定した。

使用したフィーラは、 ϕ 0.5mm である。J I S の手順に従い、単一ピッチ誤差、隣接ピッチ誤差、累積ピッチ誤差を計算し、形状特性値とした。

(2) 歯みぞのふれ： 歯みぞのふれは ϕ 1.0 mm のフィーラを使用し、万能測定顕微鏡により測定した。歯みぞのふれは偏心によるうねり及び外径のゆがみなどに基づく大きな変化と歯みぞの幅及びピッチの変化による細かい変化との重なりとして観測されることから、式(1)と同様に、歯みぞのふれのデータを $x(i)$ とおいて、1次振幅、2次振幅およびその残差の2乗平均を形状特性値とした。

(3) 歯形誤差、圧力角誤差： 歯形試験機により歯のほぼ中央部の歯形記録図をとり、歯形誤差及び圧力角誤差の測定を行った。歯形誤差は圧力角誤差成分を除いたものを用いた。また、圧力角誤差は2点のゲートを結ぶ径を境にほぼ対称に現れることが予備測定によって明らかになったことから、ゲート位置に対して片側4か所(6歯おき)の歯の左右の面について測定し平均値を特性値とした。

(4) 歯すじ方向の誤差： 歯形試験機により、上記4か所の左右の歯面のほぼピッチ円上で、歯すじ方向の誤差を測定した。多くの歯車では、ゲートに近い側が凸であった。歯すじの誤差曲線の最大差を形状特性値の一つとして選んだ。

4. 3. 5 かみあい特性と形状特性の関連

(1) 因子分析による解析

測定した特性値相互の関連を明らかにするために、多変量解析の手法の一つである因子分析法⁴⁻¹²⁾を適用した。

因子分析の目的は、多特性値により表される多次元空間における複雑な変動をより少ない代表的な因子の変動によって説明し、多変量情報を簡約化することにある。簡約化された特性値の性質は、因子を軸とした多次元空間の点として表される。この場合には、36個の歯車について、前に述べた方法によって計算した特性値をデータとし、因子分析を行った。各特性について36個の値の変動の独立性及び共通性を簡約化してほぼ三つの因子軸における変動によって表すことができた。変動に対して寄与率の高いものから第I因子、第II因子と名付けた。

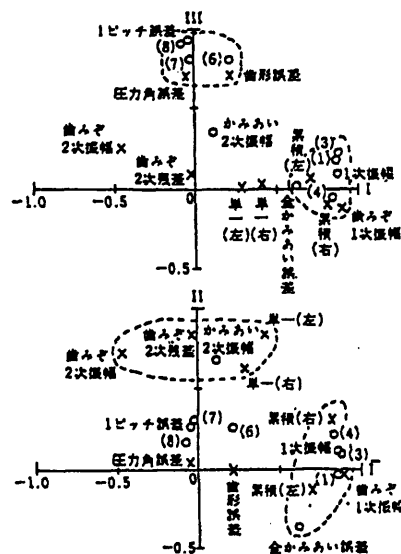


図 4.3.4 各特性値の因子負荷量

図 4.3.4 は、第 I ~ 第 III 因子に対する各特性の因子負荷量をプロットしたものである。○印はかみあい特性，×印は形状特性である。各因子を軸とする多次元空間における距離によって、各特性の共通性が明らかとなる。各特性間の距離をもとに、かみあい特性および形状特性を三つのグループに分けることができる。

表 4.3.3 かみあい特性と形状特性の相関係数表

グループ番号		かみあい特性					
		I			II	III	
特 性		1 次誤差	全かみあ い誤差	1 次振幅	2 次振幅	6 次誤差	1 ピッチ 誤差
か み あ い 特 性	1 次誤差	1.00					
	全かみあい誤差	0.66	1.00				
	1 次振幅	0.99	0.67	1.00			
	2 次振幅	- 0.15	- 0.17	- 0.13	1.00		
	6 次誤差	0.21	- 0.07	0.20	0.19	1.00	
	1 ピッチ誤差	0.00	- 0.20	- 0.03	0.08	0.86	1.00
	累積ピッチ (左)	0.74	0.45	0.73	- 0.19	0.07	- 0.01
累積ピッチ (右)	0.82	0.41	0.81	- 0.06	0.26	0.02	
形 状 特 性	歯みぞのふれ 最大差	0.49	0.23	0.50	0.50	0.21	0.03
	1 次振幅	0.72	0.37	0.74	0.29	0.12	- 0.08
	歯みぞのふれ 2 次振幅	- 0.61	- 0.44	0.62	0.46	0.24	0.39
	2 次残差	- 0.29	- 0.26	0.26	0.62	0.25	0.35
	単一ピッチ (左)	0.05	0.05	0.08	0.59	0.20	0.13
	単一ピッチ (右)	0.05	- 0.08	0.05	0.57	0.39	0.25
	歯すじ方向の誤差	- 0.08	0.11	- 0.08	0.53	- 0.01	0.05
	圧力角誤差	- 0.07	0.06	- 0.09	0.34	0.44	0.59
	歯形誤差	0.28	0.20	0.27	0.25	0.60	0.62

$$r(34, 0.05) = 0.329$$

表 4.3.3 にそれぞれのグループ内及び間での特性値間の単相関係数の値を示す。また、形状特性のうち隣接ピッチ誤差はどのグループにも属さず、かみあい特性との関連はないと考えられる。

1) 第 I グループ

第 I 因子負荷量の高い第 I グループには、かみあい特性の 1 次振幅、1 次～4 次誤差、全かみあい誤差が属している。形状特性としては、歯みぞのふれの 1 次振幅、累積ピッチ

誤差の最大差及び1次振幅が同じ第Iグループに属している。このグループに属しているかみあい特性のうち、1次振幅などは、かみあい波形の大きなうねりを表していると考えられる。また、累積ピッチ誤差の最大差、歯みぞのふれの1次振幅などの形状特性は、歯車の偏心によって変化する特性値であると考えられている。

偏心量 e と最大累積ピッチ誤差 F_t の間には、

$$F_t = 2 e \sec \alpha_0$$

の関係があると言われている⁴⁻¹³⁾。ここで α_0 は基準圧力角である。また、歯みぞのふれの振幅は、偏心量 e である。これらの関係を用いて推定した偏心量とかみあい波形の一次振幅との関係を図4.3.5(a)に示す。一次振幅は、偏心推定値の約0.9倍となっており、両者はほぼ対応しているといえる。キャビティ番号3のみが大きくはずれているが、それを調べるために金型の測定を行った。成形歯車の歯元円に相当する位置を基準に各キャビティの軸の偏心を求めると10～40 μm であったが、必ずしも成形歯車の偏心量とは対応していない。

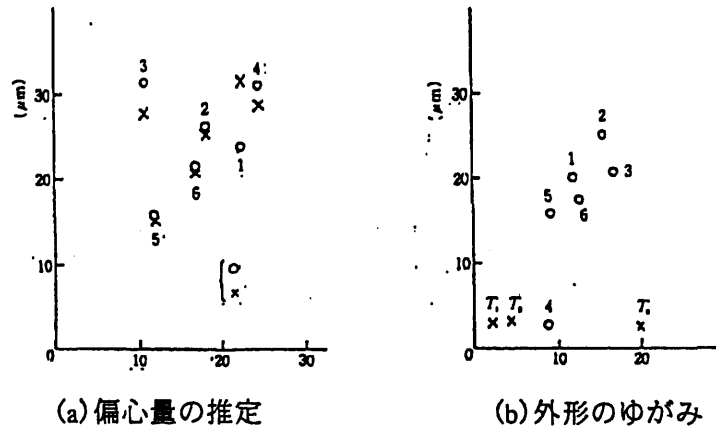


図 4.3.5 波形特性と形状誤差の関係

このことから、歯元円と歯先円またはピッチ円が別々に偏心していることも考えられる。また、軸穴ピンは、金型本体とは一体になっておらず、ピン穴に対しガタをもっていること、成形時には、抜取りのためピンを冷却していること、更に樹脂射出時にかなり大きな圧力がかかることなどから、成形歯車の偏心の現れ方は複雑となっていると考えられる。

2) 第IIグループ

第IIグループとしては、かみあい特性のうち2次振幅及び形状誤差のうち単一ピッチ誤差(2乗平均値)、歯みぞのふれの2次振幅、2次残差、歯すじ方向の誤差が属している。

一方、これらの歯車の歯先円直径を測定したところ、フィルムゲートの歯車はほぼ円形であったが、2点ピンゲートのキャビティから成形された歯車は、ゲート穴を結ぶ径と直角方向では、歯先円直径が15～25 μm 小さく、だ円に近い形となっている。この様子を見るためにとった真円度測定器のチャートを図4.3.6に示す。このような歯先円のだ円成分は、基本周期の1/2のフーリエ成分、つまりかみあい波形の2次振幅に反映する。図4.3.5(b)に、歯先円直径のゆがみと波形特性の2次振幅の対応関係を示す。フィルムゲートのキャビティ(キャビティ番号4)より成形された歯車は、金型温度 T_3 においてのみ2次振

幅が大きく、特異な点となっている。この特異な点 (T_3) においても、歯先円直径のゆがみは小さいことから、この2次振幅の増加は、外径のゆがみによるのではなく、歯の形状のゆがみの変動によって生じていると考えられる。つまり、金型温度による樹脂の流動性の変化により歯形のゆがみの変化を生じている。一方、2点ピンゲートのキャビティによって成形された歯車については、金型温度による2次振幅の変動は小さい。

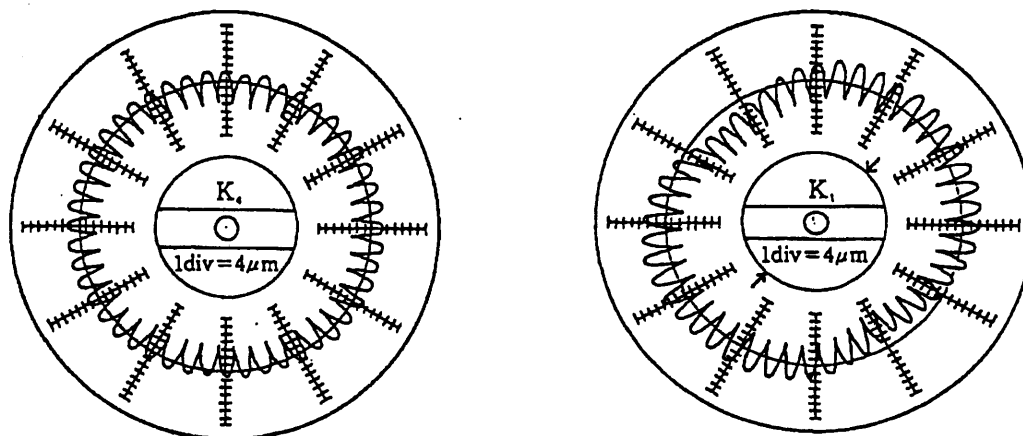


図 4.3.6 ゲートによる歯先円形状の違い

一般に、成形品の形状が金型温度のような成形条件によって変化することはよく知られていることである。また、同一の成形条件であっても、ゲートの種類や位置によって成形品の形状が変化することもある。このように、2次振幅についても、成形条件だけでなく、金型の条件との組み合わせによって変化する特性値であると考えられる。

第Ⅱグループの特性は、2点ピンゲートの場合、歯車全体の形状に関係している。また、フィルムゲートの場合には、歯の形状の変動にも関係していると考えられる。これらのことは、ピッチ誤差、歯みぞのふれの測定原理から考えて、測定結果にこのような形状の影響が強く現れることが考えられる。このような形状誤差は切削加工による金属歯車においては小さいと考えられ、収縮等の存在する成形加工歯車に特有のものであると考えられる。また、これらの特性については、ゲートの種類、位置などのキャビティの条件と成形条件によって変化の様子が変わると思われることから、十分注意する必要がある。

3) 第Ⅲグループ

第Ⅲグループには、かみあい特性のうち6次～8次誤差、1ピッチかみあい誤差及び形状誤差のうち、歯形誤差、圧方角誤差が属している。これらの特性は、一つ一つの歯のかみあいの良否に関係したもので、歯形の良否とかみあいの良否が対応していると考えられる。これらの特性の分散分析の結果、キャビティ間の変動より金型温度の変化による変動の方が大きく、歯形の良否は金型温度に依存していることが明らかとなった。

(2) 寸法特性

かみあい波形の総平均値の変動は、歯車のかみあい円の平均的な直径の変動、つまり樹脂の収縮率の違いによる成形歯車の平均的な大きさの変動を表している。近似的には、歯先円直径の変動に対応していると考えてよい。図 4.3.7 に、プラスチック寸法測定器によ

って測定した歯先円直径（キャピティごとの平均値）とかみあい波形の総平均値（キャピティごとの平均値）の対応関係を示す。相関係数 0.70 で有意な相関がみられた。また、図より分かるように、歯車の直径は金型温度により、大きく変化する特性であると予想される。

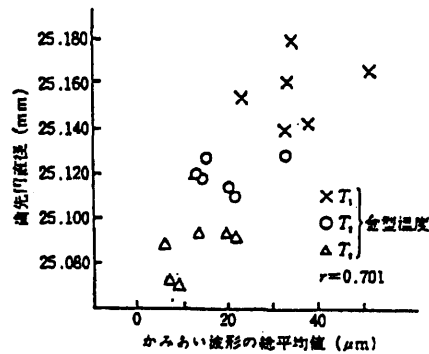


図 4.3.7 かみあい波形の総平均値と歯先円直径
(いずれも、キャピティごとの平均値を示す)

表 4.3.4 波形特性と形状特性の対応

かみあい特性	形状特性	特性の表すもの
波形特性 (I) { 1次振幅 (基本周期成分) 1次誤差 全かみあい誤差 }	歯みぞのふれ (1次振幅) 累積ピッチ誤差	偏心
波形特性 (II) { 2次振幅 (2次周期成分) }	・ 歯すじ方向の誤差 ・ 歯みぞのふれ (2次振幅・残差) ・ 単一ピッチ誤差	外形のゆがみ
波形特性 (III) { 6次誤差 1ピッチかみあい誤差 }	・ 圧力角誤差 ・ 歯形誤差	歯形の良否
寸法特性 総平均値	・ 歯先円直径 (平均)	平均的な収縮率 の変化

(3) かみあい特性の分類

因子分析の結果、かみあい特性は3つのグループに分けられ、更に寸法特性を含め、4つの特性値群をもとに検討した結果、表 4.3.4 のようにまとめることができる。更に、4つの特性値群を大きくまとめると、1つ1つの歯形の良否を表す特性と、偏心、ゆがみ

ど全体の形状の良否を表す特性に分けられたといえる。

また、プラスチック成形歯車の場合、以上の特性は、ゲートの種類、位置や金型の良否など金型(キャビティ)により決まるものと、成形条件により変動の大きいものがある。表 4.3.4 にあげた特性がいずれに属しているか知る必要の生じた場合には、成形条件と上記特性とを対応させた実験によって確認することが可能である。

4. 3. 6 結 論

1つの金型から、金型温度を変化させ射出成形した小型歯車について、二歯面かみあい試験および個別誤差の測定を行い、両者の結果の関連を因子分析法により求め、二歯面かみあい試験によるプラスチック成形歯車の評価の有効性について検討した。

①かみあい試験の解析により、歯車全体の形状を表す特性および歯形の良否を表す特性が得られた。

②歯車全体の形状を表す特性は、偏心を表す特性、歯先円のゆがみを表す特性、収縮率の変化を表す特性を含んでいる。

③以上の特性について射出成形歯車の評価を行う上で、二歯面かみあい試験は有効である。また、プラスチック成形歯車の場合、歯先円のゆがみによる形状誤差への影響が大きいので、歯車として評価する場合注意する必要がある。

ここで示したような方法は、試験で得られる各種特性の意味を明らかにし、計測特性として選定すべきかどうかを決めるための方法として採用することができる。その際、次の点に注意すべきである。

④検討の対象となる母集団を明確にし、その母集団の中でのデータに基づいた検討をすべきである。

⑤計測特性の意味を明確にするために、他の計測特性との従属性、独立性を明らかにする方法として、因子分析法が活用できる。

4. 4 第4章のまとめ

第4章では、計測の問題が生じ、計測を行い、問題を解決するまでのプロセスを計測プロセスと規定し、パフォーマンス概念に基づいて、計測プロセスの設計と評価について検討した。

第4.1節では、計測活動を構成する、計測のプロセスと測定のプロセスの構造を明らかにし、計測プロセス設計の考え方を提案をした。

- 1) 計測の問題が生じ、解決されるまでの過程は、管理的な部分である計測プロセスと作業的な部分である測定プロセスとに分けることができる。
- 2) 計測プロセスの設計は、計測の合目的性の確保と測定の信頼性の確保の問題に要約することができる。
- 3) 計測特性が決められた後の測定の評価は、測定プロセスの問題として行われる。
- 4) 測定システムは、測定プロセスの実施に必要なハードウェアとソフトウェアの総体として規定される。
- 5) 計測システムの確実性を確保するための計測プロセス設計の考え方を提案し、硬さ試験の開発を例としてそれを検討した。

第4.2節では、計測プロセスのパフォーマンスを確保する立場から、生産システムにおける品質確保のための品質設計システムを整理し、提案した。

- 1) 生産システムにおける計測プロセスの役割を、生産プロセスである検査、統計的工程管理、工程改善、工程の制御、工程設計、製品設計の立場から整理した。
- 2) 製品の生産システムを最適化するための品質設計システムの枠組みを、オンライン計測、オフライン計測の立場から明らかにした。

第4.3節では、計測プロセス設計の中で一般的な検討が難しく、共通的な方法が確立していない部分である計測特性の選択の問題について、プラスチック歯車の測定の場合を実験的に検討した。

1つの金型から、金型温度を変化させ射出成形した小型歯車について、二歯面かみあい試験および個別誤差の測定を行い、両者の結果の関連を因子分析法により求め、二歯面かみあい試験によるプラスチック成形歯車の評価の有効性について検討した。

- 1) かみあい試験の解析により、歯車全体の形状を表す特性および歯形の良否を表す特性が得られた。
- 2) 歯車全体の形状を表す特性は、偏心を表す特性、歯先円のゆがみを表す特性、収縮率の変化を表す特性を含んでいる。
- 3) 以上の特性について射出成形歯車の評価を行う上でも、二歯面かみあい試験は有効である。
- 4) プラスチック成形歯車の場合、歯先円のゆがみによる形状誤差への影響が大きいため、歯車として評価する場合注意する必要がある。
- 5) ここで示した方法は、試験で得られる各種特性の意味を明らかにし、計測特性として選定すべきかどうかを決めるための方法として採用することができる。
- 6) また、プラスチック成形歯車の場合、歯先円のゆがみによる形状誤差への影響が大きいため、歯車として評価する場合注意する必要がある。

ここで示したような方法は、試験で得られる各種特性の意味を明らかにし、計測特性と

して選定すべきかどうかを決めるための方法として採用することができる。その際、次の点に注意すべきである。

- 7) 検討の対象となる母集団を明確にし、その母集団の中でのデータの加法性と相関に基づいた検討をすべきである。
- 8) 計測特性の意味を明確にするために、従来の特徴との対応、従属性、独立性を明らかにする方法として、因子分析法が活用できる。

第5章 パフォーマンス概念による計測プロセス設計の試み

－プラスチック工程におけるオンライン管理システムの設計－

前章で提案した品質設計システムを、プラスチック成形工程を対象にしたプラスチック品質設計システムCAMP Sを実現した。その中で、工程のオンライン管理システムの設計を行うための一連の実験を行った。成形中に成形品をオンライン計測することにより工程の予測を行い、成形品の目標値に近い製品を実現し、製品のばらつきを減らすというオンライン計測の目的である。この目的を達成するための計測プロセスの設計を実際の工程の中で実現した。

5.1 プラスチック品質設計システムの実現

オフライン段階の設計における工程条件の最適化と、オンライン段階での計測と制御の最適化を通して品質向上を図る方法としての品質設計システムをプラスチック射出成形工程に適用し、その可能性について検討を行った。

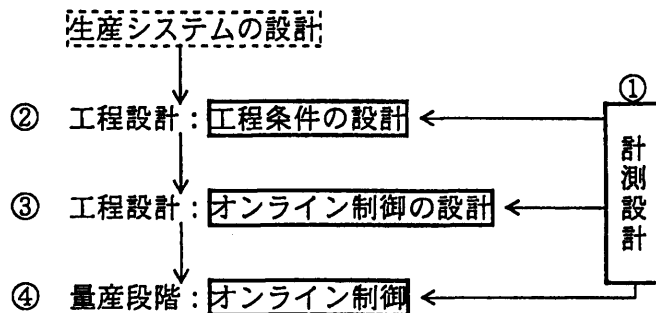


図 5.1.1 品質設計システム

その中では、品質設計システムを図 5.1.1 の様に主要な3つの部分を取り上げて、工程の設計とオンライン管理を対象に、プラスチックCAMP Sとして実現を図った。CAMP Sは、Computer Aided Measurement and Process Design and Control System の略称である。

図中の②は工程のばらつきの最適化を工程条件の選択によって実現するオフラインの工程設計の段階、③は量産段階において生じる工程のかたよりを修正するオンライン管理方法を決める段階である。そのいずれの段階においても、成形品を直接計測し、評価するための計測設計①が基礎となる。

最初の計測設計の段階においては、いろいろな成形品の特性を計測し、機能特性との関連を明らかにし、②、③、④の段階において管理の対象とする製品の計測特性を選択する。さらに、それらの特性の計測方法を最適化する。

従来、量産前の成形条件の検討や、量産時の成形品の検査は行われているが、ばらつきを考慮した組織的な検討は十分であるとはいえない。特に、成形品の機能を考えにいたした計測特性の検討はほとんど成されていないといってもよい。それに対し、計測設計、パラメータ設計からオンラインでの制御まで一貫した設計思想を新しい成形システムに取り込んだ。

品質設計システムの流れ

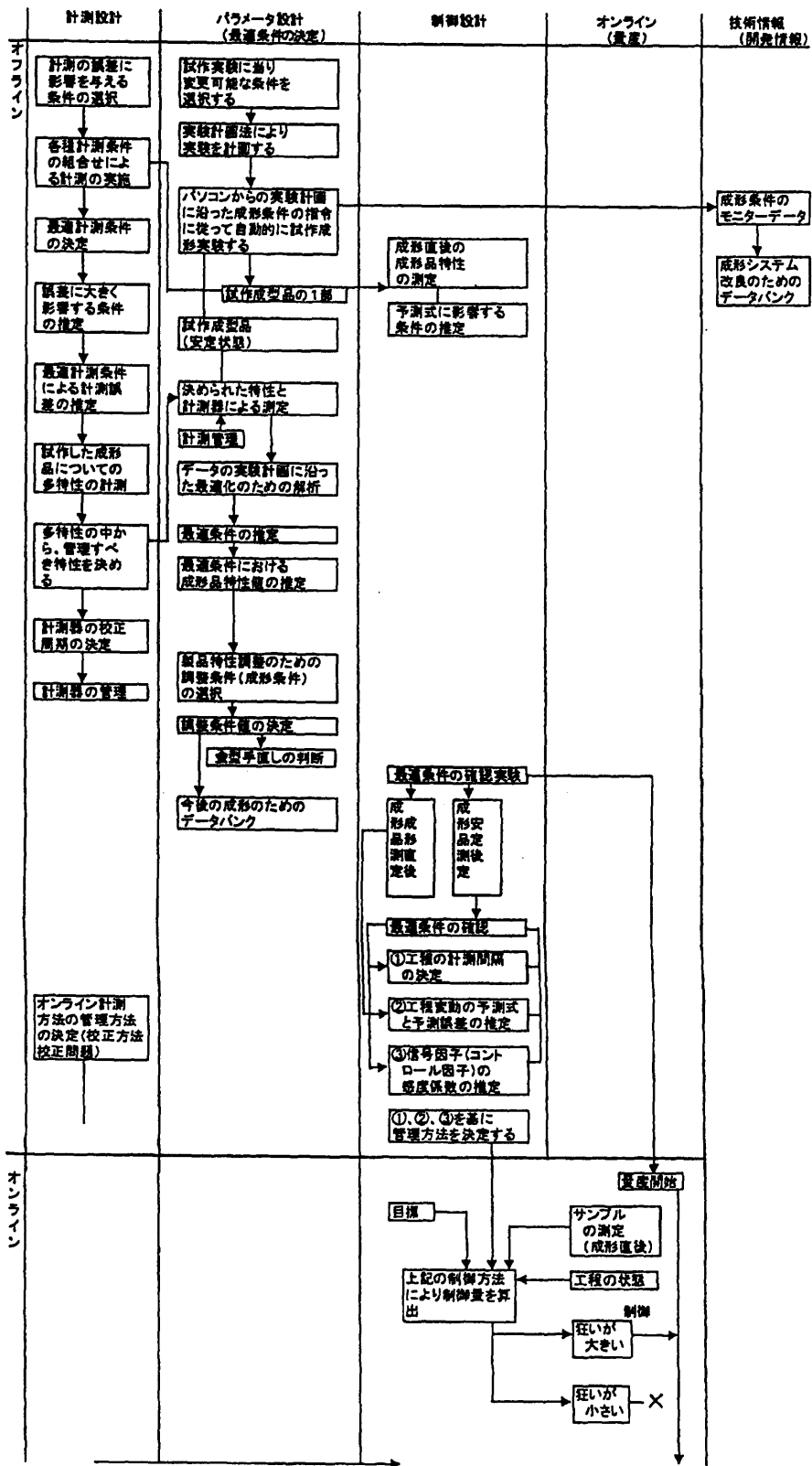


図 5.1.2 品質設計システムの流れ

5. 1. 1 システム適用の概要

本来ならば製品や金型の設計においても同様の検討が成されるべきであるが、研究の対象を工程の設計に限定した。また、工程のシステム設計の部分も含まれていない。すなわち、生産システムの基本構成要素である成形機、金型、周辺機器、樹脂はすでに決められ、与えられたことを前提に、品質のよい製品を作り出す工程の設計の実現を図った⁵⁻¹⁾。

図 5.1.2 に C A M P S に盛り込んだ品質設計システム適用のながれを示す。

5. 1. 2 ハードウェアシステム

品質設計システムを効果的に適用するために、対象工程に相当する C A M P S のハードウェア構成 (図 5.1.3) をつぎのような形にした⁵⁻²⁾。

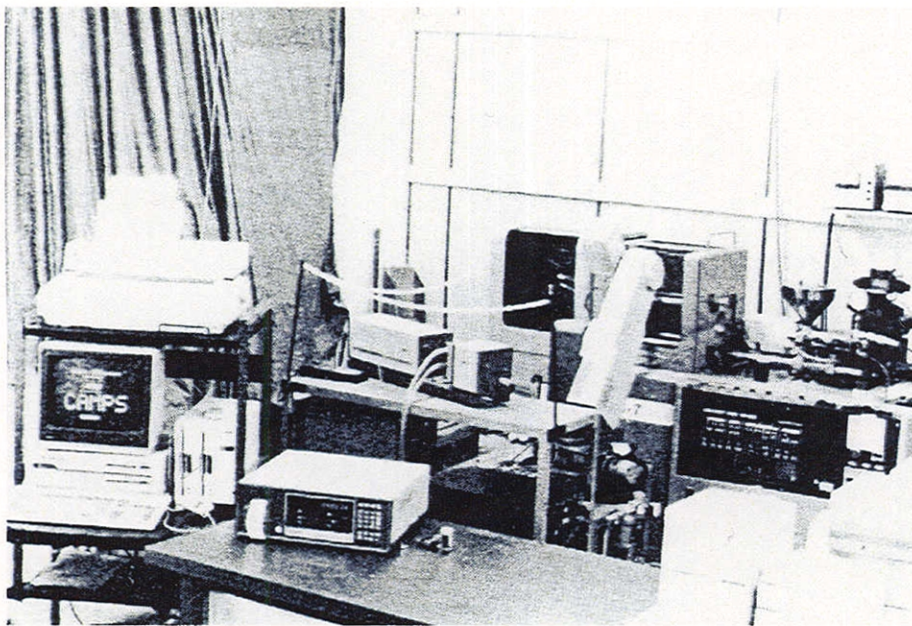


図 5.1.3(a) 品質設計システムのハードウェア：写真

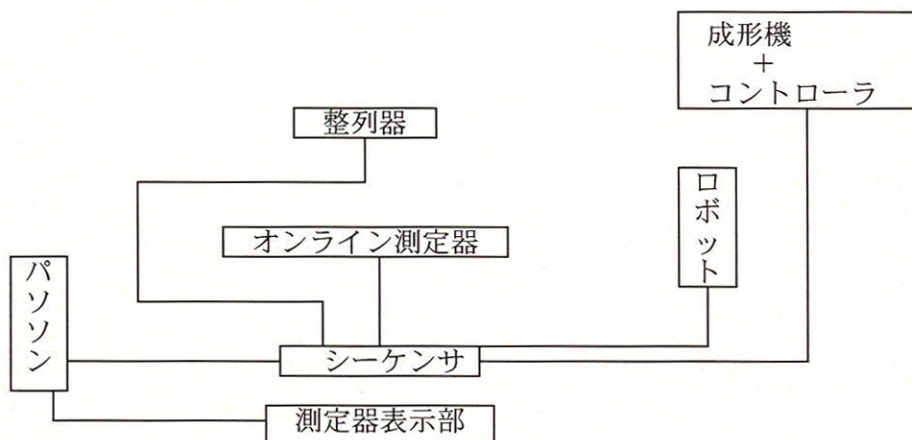


図 5.1.3(b) 品質設計システムのハードウェア

基本的な部分はプラスチック成形工程である横型射出成形機(株)山城精機製SS-7)である。その他ハードウェアとして必要な条件は次のようなもので、それを満たす機器構成としては、表5.1.1の通りである。

- ①成形条件の変更を容易にし試作を自動的に行うために、成形機にコントローラを備えている。
- ②オフラインの実験のために、製品の多種の特性を迅速に測定可能なフレキシブル計測器を備えている。
- ③オンライン計測のための計測器を備えている。
- ④量産段階でのオンライン計測のために定期的に製品をサンプリングし、計測器にセットするための自動装置を備えている。
- ⑤成形された製品を成形順に整列管理できる装置を備えている。
- ⑥システム全体を集中的にコントロールし、計算処理、データ収集するためのパソコンシステム及び周辺機器とのインターフェイスを備えている。

表 5.1.1 CAMP S の機器構成

射出成形機	SS-5
成形機コントローラ	SANJECT
オフライン用フレキシブル計測器	試作品
サンプリングロボット	MELFA RV-P2
オンライン計測器	レーザスキャンマイクロメータ (LM-1202)
製品整列器	試作
パソコン	PC9801VM

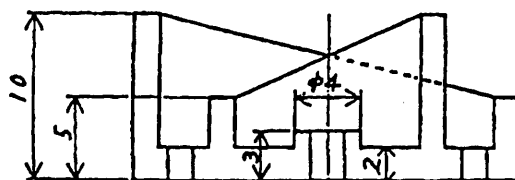


図 5.1.4 モデル製品の2重カム

成形対象のモデル製品としては、図5.1.4の2重カムを用いた。材料としては、機構部品に多く使われるPOM(三菱ガス化学製ユピタル)を用いた。

5. 1. 3 ソフトウェアCAMPS

品質設計システムの中で行うパラメータ設計、制御設計、オンライン制御、計測設計を効率的に行うために、実験の計画、SN比の計算、分散分析、損失計算、割引係数の計算などをパソコンの中で行わせるソフトウェアCAMPSを開発した。ソフトウェアは品質設計システムの主要部に対応しており、そのための作業や計算の順序に従って対話的に入力していけば、結果が得られるようになっている。

5. 1. 4 成果

最終的に、品質設計システムの適用によって、次のような成果が上げられた。

- 1) 計測設計により、モデル製品の各部の寸法特性について検討し、オフライン、オンラインの管理特性としてカム高さ及び外径を選択した。
- 2) 計測設計により、オフライン用フレキシブル計測器を開発し、パラメータ設計の方法により測定条件の設定を行った。
- 3) パラメータ設計により、工程における成形条件を最適化することによって、成形のばらつきを標準偏差で $16\mu\text{m}$ から $5\mu\text{m}$ になり、 $1/3$ に低減できた。
- 4) 製品の独立な二特性の制御の方法を明らかにした。
- 5) 制御設計において、オンライン計測の条件と、制御の条件の検討を行い、割引係数法を用いた制御を設計し、設計の方法を明らかにした。
- 6) 設計された制御方法を実際に工程に適用し、生産開始時に起こるドリフトの改善と、平均値の制御を行った。
- 7) 品質設計システムの体系的なアプローチと実験により、短時間での成形工程の最適化を行うことが出来た。
- 8) 品質設計システム適用の方法はパソコンソフトウェアCAMPSの形にまとめた。

次節以降では、CAMPSの研究の内、制御設計、オンライン管理の部分について詳しく述べる。

オンライン予測・制御システムを有効に機能させるためには、オンライン管理システムの設計として、特に重要な項目として、計測間隔と、計測方法の問題がある。オンライン計測の間隔は実際の工程の変動の状態によって決められる。一般に、時間間隔が長くなるとその間のばらつきは増すが、計測誤差や、要求されるばらつきの大きさとの比較によって、最適なオンライン計測の時間間隔が決められる。パラメータ設計がうまくいって、長時間での工程の変動も十分小さくなったとしても、工程が正しく動いていることをチェックするために、オンライン管理は行われる。その場合、計測間隔は長くなり、余り厳しい計測をしなくてもよいことが多い。

オンライン計測の考え方は、検査とは根本的に異なり、工程で次に作られる製品集団を対象とするものである。生産システムの中での計測の歴史をみると、「検査・計測」とよくいわれるように、いまだに計測と検査は同列に扱われている場合が多い。ここでは、生産システムの中での「計測」と「検査」を次の点で区別する。検査とは、すでに出来上がった製品に対して合格・不合格を判定し、アクションをとるためのものである。これに対し、オンライン管理は、これから生産する製品のばらつきすなわち工程のばらつきを推定し、工程を制御する⁵⁻³⁾。すなわち、オンライン計測は工程そのものをアクションの対象としていることで全く異なった概念である。このような制御は“工程の校正”とも呼ばれ、その基本的な考え方は計測器の校正と同じである。

従って、オンライン計測は、その時点のあとで工程が作り出す製品の平均値を推定することを目的に行われるものである。一般に、オンライン計測は同じ様な製品を計測していることから、測定範囲は狭くても感度の高いものがよい。オンライン計測の信頼性を確保するためには、計測器の校正方法とその時間間隔が適正に取られなければならない。校正方法としては、製品に近い現場標準による定点校正で十分な場合が多い。

5. 2. 2 オンライン計測と工程の予測・制御

予測・制御の流れを詳しく検討するために、工程稼働時の手続きを図5.2.2にまとめた。

オフラインでの設計段階で、いくつかの式を前提条件として決定しておく必要がある。実際の手続きはステップⅠ～Ⅴになるが、予測・制御の信頼性を高めるために、次の方法が考えられる。

ステップⅠ： オンライン計測によって、定期的に工程の状態を把握する。測定値の信頼性を高めるために、測定のサンプリング数を増し、その平均値を測定値 x とする。但し、数を大きくするとタイムラグによる制御遅れのための誤差を生じる。

ステップⅡ： オンライン計測の結果から次の製品の工程平均を予測する。設計段階で求めておいた予測式 $f(x)$ を使い、工程稼働時に工程平均 y の予測を行う。一般に、予測式は制御間隔の初期値を独立変数 x 、制御間隔内の製品の平均値を従属変数 y とした1次回帰式 $y = \beta x + \alpha$ により表す。予測式を使わない場合は、従来の制御で考えられているように予測工程平均値 = 測定値、つまり $y = x$ の予測が行われている。

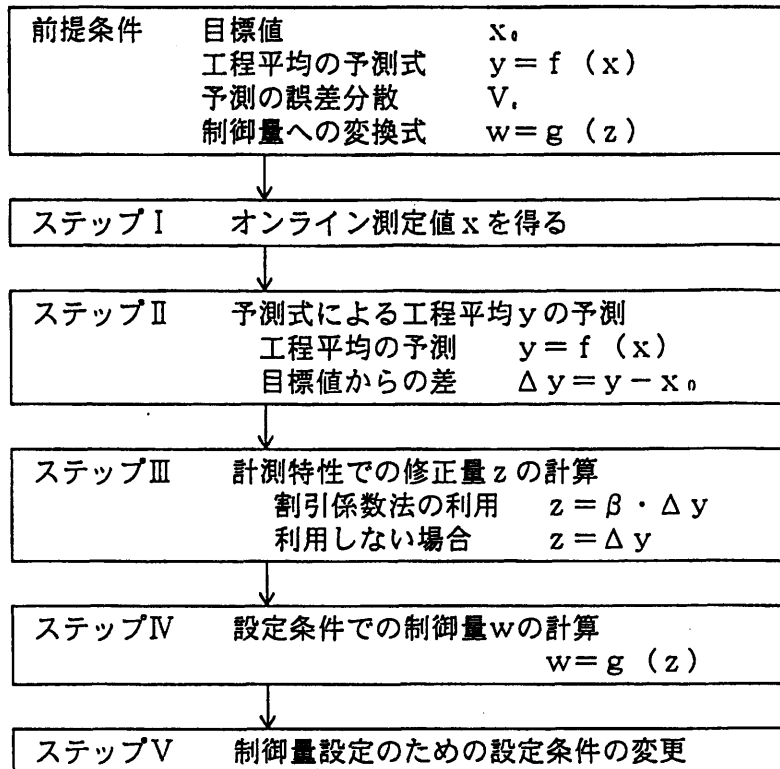


図5.2.2 予測・制御の流れ

ステップⅢ： 目標値と工程平均の予測値の差をもとに、工程の修正量 z を決定する。工程のハンチングを起こさないようにするため、予測の誤差を考慮した修正量の決定方法である割引係数法を適用する。一般に、予測の誤差分散を V_e 、 y の目標値 x_0 からの差を $\Delta y = y - x_0$ とすれば、

$$F_0 = (\Delta y)^2 / V_e \quad (5.2.1)$$

とおいた時に、割引係数 β を、

$$\beta = \begin{cases} 0 & F_0 \leq 1 \text{ の時} \\ 1 - 1/F_0 & F_0 > 1 \text{ の時} \end{cases} \quad (5.2.2)$$

として、計測特性での修正量を $z = \beta \cdot \Delta y$ とする。割引係数法により、実際の修正量は小さめになる。これを適用しない場合は、 $z = \Delta y$ となる。

ステップⅣ： 計測特性での修正量 z から調整因子の実際の操作量 w を決める。修正量から操作量への変換式 $g(z)$ の信頼性を上げるには、工程稼働前に、再現性確認のための実験を行っておく。

ステップⅤ： 調整因子（例えば射出圧力）の値を実際に変える操作を行う。人間に起因する設定誤差は、条件設定装置でのデジタル値による自動設定により避けられる。

既にオフライン段階でのパラメータ設計等により工程変動が小さくなる最適工程条件が選ばれているが、それでも調整しきれない変動を小さくするために、また、予測できない条件変化による製品の特性の変化に対応するため、このような工程の計測・予測・制御が

行われる。もし、パラメータ設計で選ばれた最適条件により、十分に小さなばらつきで生産が可能ならば、予測・制御システムとしてではなく、監査的な計測が残される。

5. 2. 3 オンライン管理システムの設計

このような予測・制御システムをオンライン管理システムとして有効に機能させるためには、オンライン管理システムを設計する際に、表5.2.1の条件について決定しておく必要がある。これらのパラメータは、試作のなかで検討を行い、量産試作をする段階までに決められるもので、オンライン管理システムのオフライン段階での設計に相当する。

表5.2.1 オンライン計測予測制御システムの設計で決められる条件

(I) オフライン管理段階で決められるパラメータ
①計測特性の選択,
②計測特性の目標値と管理限界の設定,
③調整因子の選択,
(II) オンライン計測方法の管理のパラメータ
④計測方法の選択,
⑤計測方法の校正間隔, 校正方法の設定,
(III) 工程制御の管理のパラメータ
⑥工程の計測間隔, 制御間隔の設定,
⑦工程の予測方法と予測式の設定,
⑧製品の特性での修正量を求める方法(割引係数法)の設定,
⑨調整因子の操作量を求める方法の設定,
⑩調整因子の操作方法の設定.

①から③は、製品の設計に関わる問題で、製品設計段階において決定される事項である。工程において計測し管理する特性は必ずしも品質特性であるとは限らない。品質特性と関連があり、オンラインで測り易いものであればよい。また、調整因子は、特性を変化させる事ができ、SN比に影響しない条件を取り上げる。

④の計測方法としては、迅速性、環境条件に対する頑健性、測定範囲が狭くても高感度であること、等が必要であり、⑤の計測方法の管理方法及び計測誤差について、計測設計の課題として検討しておくことが重要である。

⑥から⑩は、工程の予測・制御に直接関わるものであり、工程変動の状況に合わせて決められる。⑥は、工程変動の周期分析により最適間隔が決定される。⑦～⑩については、前項で検討した通りである。

また、これら設計されたシステムは経済的にも最適なものではない。その評価には損失関数の考え方が応用される。

5. 2. 4 計測プロセス設計の実験の考えかた

前項で述べたようにオンライン計測に基づいた工程の予測制御システムの設計の過程を

整理すると次のようになる。

- ①オンライン計測のための測定システムを定める。
- ②工程変動データを実験的に得て、制御周期を求める。
- ③計測特性からの工程平均の予測式を求める。
- ④修正量を決定するための方法を定める。
- ⑤変換式のために信号因子の変化に対する特性の変化量を求める。

このような検討を行うことを制御設計として行い、工程稼働のためのパラメータ(表5.2.1)を決定する。

オンライン計測による工程の予測制御システムの効果を確認するとともに、制御設計、量産段階でのオンライン管理の手法適用上の問題点について検討するために、プラスチック成形工程をモデル工程として、次のような実験を行った。

- 成形実験1 モデル工程の工程変動と制御シミュレーション
- 成形実験2 成形品の特性予測のための条件の検討
- 成形実験3 成形品の冷却履歴と寸法変化の検討
- 成形実験4 予測制御システムによる制御実験

これらの実験を通し、オンライン計測の設計過程上の問題についての検討を行った。また、この一連の実験はプラスチック射出成形工程での制御設計のモデル化のためのものである。