

計測におけるパフォーマンスの研究

小池昌義

計測におけるパフォーマンスの研究

目次

- 第1章 緒言：計測プロセスとパフォーマンスの考え方
 - 1. 1 計測におけるパフォーマンス
 - 1. 2 人間と計測の関わり
 - 1. 3 計測パフォーマンス評価の基本
 - 1. 4 マンマシンシステムとしての計測システム
 - 1. 5 計測プロセス設計
 - 1. 6 生産システムにおける計測のパフォーマンス
 - 1. 7 本研究の背景
 - 1. 8 本論文の構成
- 第2章 測定システムの誤差の評価
 - 2. 1 測定における誤差の評価の考え方
 - 2. 2 測定のSN比
 - 2. 3 校正を前提にした測定の誤差の成分の分解
 - 2. 4 他の誤差評価手法の考え方との対応
 - 2. 5 硬さ試験の不確かさ評価への不確かさ表現ガイドの活用
 - 2. 6 不確かさ表現ガイドの問題点 - SN比の方法との関連
 - 2. 7 第2章のまとめ
- 第3章 測定システムのパフォーマンス評価：マンマシンシステムの事例
 - 3. 1 計測における過ちとデータの変動
 - 3. 2 寸法測定におけるパフォーマンスと誤差のモデル
 - 3. 3 測定過程と測定誤差の関連：測定過程解析装置による実験
 - 3. 4 マンマシンシステムとしての測定システムの評価と改善の可能性
 - 3. 5 第3章のまとめ
- 第4章 計測プロセスのパフォーマンス評価と設計
 - 4. 1 計測プロセスとその設計
 - 4. 2 生産システムにおける計測のパフォーマンス
 - 4. 4 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. 5 第4章のまとめ
- 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
 - 5. 1 プラスチック品質設計システムCAMP Sの実現
 - 5. 2 オンライン計測の考え方と実験の組立
 - 5. 3 モデル工程の工程変動と制御シミュレーション
 - 5. 4 成形品の特性変化とその予測
 - 5. 5 制御効果確認のための実験
 - 5. 6 第5章のまとめ
- 第6章 生産システムにおける計測プロセス設計
 - 6. 1 生産プロセスにおける計測特性
 - 6. 2 評価指標 - 計測特性と機能性
 - 6. 3 計測プロセスのサポート部
 - 6. 4 計測プロセス設計の手順
 - 6. 5 オンライン計測の設計の手順
 - 6. 6 まとめ - 計測のパフォーマンス
- 第7章 結言
- 参考文献
- 謝辞
- 本研究に関連する研究論文、発表、文献など

第1章 緒言：計測プロセスとパフォーマンスの考え方

計測は重要である、と一般的に言われているが、現実には企業の中で計測担当者が置かれている状況を見ると、必ずしも重要な役割を果たしているとはいえない。例えば、計測担当者は、品質保証部の中で計測器の管理を行っているとか、製品等で品質問題が生じたときに測定を要請され測定値を出すことが要求されるなどの活動が中心であり、それなりの評価はされているが、全体の企業活動の中で積極的な評価は受けていないのが現実である。そこには、測定という作業的な部分にその仕事を限定され、積極的に企業活動に貢献できなかったという背景がある。計測という立場からみれば、測定値を出すという核となる測定の役割と、測定が必要になった問題に対して有効な解決策を立案し解決するという一連のプロセスの構造が十分に認識されていないことによると考えられる。

本研究は、計測と測定の区別を明確にするとともに、生産システムの中で計測が果たすべき機能を計測におけるパフォーマンスの立場から解明し、計測が生産活動に積極的に関わる方向を明らかにすることを目的とする。

第1章では、計測に関わる基本的な問題を検討し、研究の方向を明らかにする。

1. 1 計測におけるパフォーマンス

計測とは、本来、単なる測定という作業プロセスだけでなく、計測の目的に合わせて、測定の計画を立て、測定を実施し、データを解析し、さらに測定結果を有効に活用するアクションを取るための体系的プロセスである。しかし、一般には、測定を科学的な操作として抽象化し、逆に単純なデータ獲得の作業プロセスとして処理してしまうことが多い。その結果、計測自体が、測定という作業的な部分との区別を曖昧にして、その成果を必ずしも十分にあげていないという状況がある。ここでは、計測自体の価値を高めるための方法を積極的に提起するため、計測におけるパフォーマンスという概念の提起を行う。

本研究では、測定と計測を次のように区別して考える。測定とは、「ある量を、基準として用いる量と比較し、数値又は符号を用いて表すこと」(JISZ8103 計測用語¹⁾)という定義に代表されるように、測定量を観測し、数量化するという作業的な過程であるとする。一方、計測とは、「特定の目的を持って、事物を量的にとらえるための方法・手段を考究し、実施し、その結果を用い所期の目的を達成させること。」(JISZ8103 計測用語¹⁾)という定義に代表されるように、計測の必要性から、測定を行い、所期の目的を達成するという、広い立場での一連の過程であるとする。このような差は、実際の測定や計測の場面で十分に認識されているとは必ずしもいえない状況にある。

さらに、測定、計測の時系列的な一連の過程を「測定プロセス」、「計測プロセス」と呼ぶ。また、測定プロセス、計測プロセスの中で活用されるハードウェアとソフトウェアとの集合を「測定システム」、「計測システム」と呼ぶ。ハードウェアにはそのプロセスで利用される測定器や装置を含み、ソフトウェアには測定条件、校正方式や管理方式などが含まれる。

人間にとっての計測には、いろいろな側面があるが、本研究では、計測を人間が社会的な立場から生産を行うという目的に対する機能とみなし、この機能を実現する過程(プロセス)とそれが生み出す結果をパフォーマンスと名付けることとする。従って、計測のパ

パフォーマンスの概念の中には、計測の主体となる人間による計測の目的の設定、計画の設定、測定の実行、測定結果の処理、評価、活用などの過程と、その達成度を含む計測の広い意味の評価を含むことになる。計測システム及び測定システムは必然的にマン・マシン・システムとして構成されることになる。

1. 2 人間と計測の関わり

社会において広く計測あるいは測定が行われているが、それを目的の面から整理すると次のような場面があげられる。

- ①人間の行動のための五感による計測
- ②知識の獲得のための計測
- ③取引・証明のための計測
- ④生産活動のための計測

人間の五感は、人間にとって根源的な測定であり、その生存に関わるものである。人間は、見る、聞く、嗅ぐ、触る、味わう、など、周囲の状況を測定しながら、その行動を決めている。人間は誕生の直後から、学習を積み重ね、その結果として生活を続けている。この場合の計測の目的は人間の生存行動のためのものであり、個々の測定の誤差が大きいたとしても、最終的に、その時々の人間の判断が的確であればよい。そのために、人間の五感をフルに活用し、総合的な判断が下されることによってその生存が確保されているといえる。生存を確保するという目的に対して、人間はきわめてパフォーマンスの良い計測システムといえることができる。

しかし、測定システムとして人間をとらえた場合には、一部の例外を除き、一般的には個々の量の測定としては、誤差が大きく、正確さ、安定性に欠点がある。正確さが必要とされる生産現場で、センサーとしての人間が使われる場面として、官能検査の分野がある。官能検査では、対象の状態に対する、人間の五感を用いた測定が行われているが、最終的には人間の総合的な判断としての測定結果が要求される場合が多い。その中では、総合判断を迅速に行うという目的に対して、パフォーマンスは高いことがあるが、個々の項目に対する測定結果には問題が多い場合がある。例えば、表面状態の測定において、個々の傷の大きさや深さなどの定量的測定は人間には難しいが、総合判断としての表面状態の良否の判断は人間による方が速く、的確な場合がある。生産現場では、人間に頼る官能検査を機械に置き換えようという努力が行われている。しかし、個々の測定項目については測定器に置き換えることができても、総合的な判断を下すことや測定時間の点では、まだ、人間の方が優れている場合が多い。すなわち、いくつかの測定項目の組み合わせとして総合的な判断が要求されている場合には、人間のパフォーマンスは機械のそれに比べ高いことが多い。ただし、本論では、測定対象を直接数量化しようとする官能検査の領域には立ち入らず、後で述べるように測定の過程でオペレータ（作業員）あるいは判断者としての役割を果たす人間を測定系の中に含んだマンマシンシステムの問題として取り上げる。

知識獲得のための計測②においては、物理現象を観測し、それを一般的な法則として抽象化するためのデータを与える。この場合には、測定の機能としては、測定対象である量の物理尺度に対する比例性及び測定の精密さ（ばらつきの小ささ）が要求される。多くの物理現象は比例的であり、物理量は比例的な関係として表現される場合が多い。このよう

な測定においては、比例定数を未知／既知の定数としておいたとしても、比例的な尺度構成ができれば十分である。このような尺度構成を確立する上では、感度係数がなんであれ物理量と測定値の間の比例関係に着目すればよい。確かに、物理の体系としての一般性と科学的合理性を追求すれば、そこでは絶対的な量の測定が必要になる。物理定数の決定、物理量による計測標準の設定という場面がそれに相当する。多くの場合、設定された標準や物理定数を用いて絶対値（感度係数）を決めること、すなわち、校正が可能であり、絶対値または比例関係の感度係数の値自体を問題にしなければならないことは少ない。

一方、精密な観測によって一般法則からの小さなはずれを知ることによる新しい発見が行われることもあり、測定の精密さはこの面では重要である。新しい現象を検出するという立場では、その現象を捉えるだけの感度さえあれば誤差が大きくてもよい場合もある。誤差の大きい中で現象を捉えるために、経済性を無視しても観測を反復して誤差を平均化することも行われる。しかし、新しい現象を生産に利用していく立場では、現象及びその測定には再現性、安定性が必要であり、誤差に対してシビアな立場が要求される。

それに対して、③④の計測は社会組織的な活動であり、社会的なシステムとして計測が行われる。そこでは、個々の測定においては特殊性を認めるとしても、結果に対して社会的な合理性と共通性が要求される。たとえば、取引証明の場合には、当事者間の合意に達するだけの合理性が必要である。本来ならば、取引のための測定の場合、その結果がいかにも誤差を持っていようと、納入側と受け入れ側の取引の当事者が納得し合意すればよい。しかし、実際には、その結果の影響が単にその当事者だけにとどまらず、社会全体に関わるという取引自体の社会性と社会的正義の観点から、計量法などにみられるような形での確からしさの確保のための方策をとることが要求されるようになる。

すなわち、生産活動のための計測において「確からしさ」が必要なのは、社会の中で技術的な合理性を確保するためである。本来、一つの製品の生産のためのシステムであれば、関連した一連の生産系列という閉じた系に対して計測の共通性があればよい。すなわち、その製品の生産のためという閉じた系の中での整合性さえあれば、その製品の生産は可能であり、測定量の絶対値を必ずしも必要とはしない。しかし、現実には、個々の生産システムが複雑に絡み合っていること、また、生産された製品が社会性を持っていることから、トレーサビリティ体系や計測器の校正技術などの助けをかりて、その絶対値を確保せざるを得ない状況にある。品質システムの国際規格 ISO9000 シリーズの中で、品質システムの要件として計測のトレーサビリティの確保が上げられているのは、個別的に共通性を確保するのではなく、絶対値を通して計測の共通性を確保するためである。

このように、社会システムの中での計測においても、その目的を達成するためには正確さを含めた計測の確からしさが要求されている。計測のパフォーマンスを明らかにする上で、これをどのように確保するかが重要であることが分かる。本研究での検討対象の計測システムとしては、主として④の生産活動の中での計測システムを取り上げることにする。その理由は、社会の中で組織的に行われている計測の大部分がその中に含まれるからである¹⁻²⁾。

1. 3 測定システムのパフォーマンス評価の基本

計測のパフォーマンスを評価するということは、計測自体を計測することに他ならない。

そのためには、ただ単に測定を積み重ねればよいというわけではない。計測を計測するためには、独自のシステムが必要である。そのなかでは、何を如何に評価するかという、評価の方法論が重要である。

計測は、本来、対象物の性質に関する定量的な情報を取り出すことを基本として行われる。測定を可能にし、計測技術として確立していく上での初期段階では、観測によって定性的な情報を取り出すという形での物理現象の発見または検出が重要である。しかし、その物理現象を利用していくためには、計測の高度化により定量的な情報を正確に獲得することが要請される。計測の高度化の中では、目的とする特性とそれを代表する特性の関係の研究が行われ、計測すべき特性への置き換えが行われる。その置き換えができ、測定項目が決められた時点では、パフォーマンス評価の問題は測定システムの誤差評価の課題として検討される。

計測の中心をなす測定システムの機能は、「対象物の性質を基準に照らし合わせて数量化する」ことにあり、最終的に測定結果を数字として表すことが要求される。その測定結果の誤差の大きさは、測定値の確からしさを表現している。従って、測定の誤差を定量化するという測定のパフォーマンス評価が、最初に行われる。

本論第2章では、測定システムの出力である測定値の信頼性を定量的に表す誤差の評価の考え方を整理し、誤差の大きさの評価方法を検討する。

1. 4 マンマシンシステムとしての計測システム

計測を生産システムのなかで捉えようとしたとき、計測／測定システムを、その構成要素からみて3つの階層に分けて考えることができる。すなわち、計測の中心になる作業的な部分である「測定」と、測定を有効に行うための「計測」の活動を行う系として、次のような3つの階層に分類することができる。

- ①測定器単独のハードウェアシステム
- ②測定者、測定器、周辺条件を含めた測定システム
- ③計測の目的を実現する計測システム

①は、センサと表示部を含む測定器単独のシステムである。測定量を検出するという意味で測定の基本となるシステムである。②は、測定という作業的な部分を広くとらえたものであり、測定者、測定条件あるいは測定器の管理方法などのソフトウェアをその構成要素として含めた「測定」のためのシステムである。さらに、③は、測定という作業的な部分に限定されず、計測の目的、計測の計画、評価、アクションの妥当性など計測の過程全体を含み、その社会的な位置づけからみた「計測」のためのシステムである。

計測のパフォーマンスを検討する場合には、そのそれぞれの階層に応じたシステムの機能と性能を評価していくことが必要になる。従来、測定の部分は、①のような測定器というハードウェアだけでその性能が議論されることがほとんどであった。それに対し、ハードウェア単独で測定が行われるわけではなく、また、測定の誤差の大きさも一義的に決まるものではないという現実から、いかに測定という作業的な部分であっても、②のような測定システムとして性能を評価することの必要性が強調されるようになってきている。さらに、計測プロセスは測定という作業だけで完結するのではなく、測定に至るまでのプロセス、測定値を得てからアクションを取るまでのプロセスを伴う。計測の有効性という観

点からパフォーマンスを明らかにする上では、その結果を活用する③のシステムのあり方が重要である。このような③の階層でのパフォーマンス評価のあり方を明らかにするのが本研究の目的のひとつである。

前に述べたように、①、②の階層では、測定項目が決められた場合にどれだけ有効な「測定結果」を得られるかが主要な問題である。

本論3章では、測定システムをマンマシンシステムとしてとらえ、人間の関わった測定システムのパフォーマンスを評価するための基礎として誤差評価の方向を明らかにする。特に、人間が測定者、すなわち、オペレータあるいは判断者として計測システムに深く関わった状況の中での評価について、実験的な方法の検証を含めて明らかにする。

1. 5 計測プロセス設計

測定において、計測特性が決められたところから出発した場合には、本来の計測の目的が忘れられ、結果の数値が一人歩きすることが多い。従来、計測の関係者は、ある測定項目が決められて、測定結果を出すことだけを要求され、計測の目的とするところから切り離されがちであった。そのような状況では、計測が有効に機能しないことがいわれるようになってきている。計測が本来の力を発揮するためには、単に測定の作業的な面だけを対象とするのではなく、計測本来の目的を考慮した計測の計画と評価を進める必要がある。すなわち、前節の③の計測システムの階層での問題であり、計測の目的に沿った測定項目を選択する段階および測定結果に基づいてアクションを取る段階を含む階層の問題である。ここでの問題は、計測プロセスの全過程を管理する計測の管理者が、いかに測定のシステムを現実の生産システムに関わらせていくかという問題になる。

測定結果の数値の確からしさという点から見ても、測定結果の数値は単独に存在するものではなく、その数値を得るための測定システムの確実性の問題である。測定システムを検討するにあたって、時間軸に重点をおいてみれば、時間的に変動する計測システムを校正するという管理システムの問題であり、どのような目的で計測を行い、結果を役立てるか、という一連の測定計画の問題である。また、空間的な軸で考えれば、計測システムがどのような場面で展開されるか、測定の条件がどの様に規定されているか、に大きく依存する。

計測システムを構成するハード及びソフトの要素から云えば、計測器、計測対象、測定者、計測担当者、管理システムとしての校正（標準）などの個々の要素の信頼性と、環境条件の変動に対する測定結果の変化が評価の対象となる。さらには、そのような信頼性を確保するためのコストなり、エネルギーの大きさも重要な要素である¹⁻³⁾。

計測の評価と云うと、比較的狭い範囲での計測結果の評価を指すことが多いが、誤差評価をベースにして、計測の信頼性の評価と改善を計測のパフォーマンスの立場から行う活動を、「計測プロセス設計」と呼び、生産システムとの関連の中で、本論第4章で基本的な考え方を整理する。

1. 6 生産システムにおける計測のパフォーマンス

生産システムの中で計測の果たすべき役割が多様化する中で、計測に対する要求も高度化している。ここでいう生産システムとは、単に製造の現場を指すのではなく、研究開発

から製品設計・製造技術・生産設計・製造・アフターサービスまでの一連の生産活動を含めて考える。従来、計測は、製造業の中では、検査と同義語として使われ、検査＝計測という概念が一般化してきた。検査自体は生産された個々の製品に対する合格・不合格という判断をするアクションであり、出荷製品の品質には関わるが、製品全体の品質向上には寄与しない。そのことは、計測技術は品質管理の基礎として重要であるといわれながら、それ自身が価値を生み出さないと考えられてきた歴史と表裏一体であった。そのなかでは、計測管理は計測器の管理であると考えられてきたが、そのような考え方では計測を全体としてとらえることができなくなっている。

製造形態が進み、製造設備と測定器が一体として設備されることが多くなると、生産設備と測定器との区別がつかなくなり、全体のマシンとしてのパフォーマンスを検討することが必要になる。そこでは、前に分類したマンマシンシステムを、ハード面からみて次の二つに層別して検討することが必要になる。

①測定器＋作業員（測定者）

②加工機＋測定器＋作業員（加工者・測定者）

①では、測定のためのシステムとしての検討が可能である。しかし、②では測定器は単独には存在し得ない。多くの場合、加工システムの一部として機能しており、加工のためのデータを提供している、と考えられている。逆に、計測の立場からみた場合、正確な加工という目的との関連で、加工と不可分のものとして測定が存在していることになる。すなわち、②では、計測の目的である加工をシステムの中に含んだ形で、計測システムの設計がなされることに相当する。

計測の役割が、検査から工程内の計測による生産システムに関わる情報の生産、さらに開発設計段階での知識情報の生産に移るに従って、計測情報の生産を行うための計測の重要性が見直されている。生産システムにおける計測は、大きく、開発設計段階での製品設計評価のためのオフライン計測と、製品製造中の工程に関する情報を得るためのオンライン計測とに分けることができる。そのそれぞれの特徴に合わせた計測システムが設計されなければならない。

オンライン計測においては、環境条件の変化に強く、測定速度が早く、狭範囲であっても感度及び精度の高い測定システムが必要である。また、オフライン計測としては、量産試作段階では、大量の試作品の多くの計測項目を、迅速に計測できるシステムが必要である。さらに、研究開発段階では、試作製品の機能の計測が必要になる。多くの計測器は自動化が進んでいるが、自動測定器についても最終的には人間による校正や管理が行われる。このような系では、人間を含めた計測・加工システムに対する管理システムを設計する必要がある。

このような生産活動における計測の役割を整理し、計測を製品の品質の向上に寄与させて行くための方法を明らかにし、その方法を品質設計システムとしてまとめた。ここでは、設計段階で製品品質を意図的に設計し実現するという意味で品質設計システムと名付けた。品質設計システムでは、開発設計段階でのオフライン計測、生産段階でのオンライン計測という形でその役割を明確にし、それぞれの特徴に合わせた計測プロセス設計が行われる。さらに、オフライン計測に基づいたパラメータ設計、オンライン計測に基づいた工程の管理の方法を明らかにした。

このような品質設計システムは、計測の目的をその一部に取り込んだ大きな意味での社会的計測システムとすることができる。逆に、品質設計という計測の目的をシステムの中を含むことによって、生産システムの中での計測プロセスが完結するともいえる。

1. 7 本研究の背景

本研究は、計量研究所で行われた。計量研究所としては計測技術を技術開発に活用するという方向を目指しているが、本論文はその成果の一部である。本研究は、次のような背景の下に進められた。

国立の研究所としての計量研究所の中で、計測における誤差あるいは精度の扱いは大きな課題であった。1956年、計量研究所は検査を中心とした検定所から、計測の研究所へと組織変更を行ったが、計量法という法律を支援するという課題を抱えており、全体的に標準開発の研究、誤差評価のための研究が必要であった。

計量研究所の中では、新しい工業量の計測標準としての硬さ標準の設定という課題に対して、実験計画法の活用により大きな成果を上げた。例えば、試験片の同じ所を2度測定することができないという破壊試験の中で、測定対象のばらつきと測定の繰返しのばらつきが交絡するという問題や、試験条件による硬さ値が変化するという問題に対して、実験計画法が有効な実験手段を与えた。1960年、新幹線のベアリングの硬さに計量研究所の標準が適用され、広く使われるようになった。さらに、硬さ標準の研究成果が、計量法に組み入れられたのは2000年であり、新しい公的標準の実用化には長い時間がかかるのが現実である。

一方、誤差評価の面では、当時、標準が持つ誤差について十分な検討は行われていなかったため、計量研究所内に精度委員会が作られ、所内外の実態が調査された。これらの成果を計測自動制御学会の委員会の活動として展開し、「測定器の性能通則—精度に関するもの」という形で精度に関するJIS化を図ったが、業界の時期尚早という反対により、結局はJIS化出来なかったという経緯がある。また、不確かさガイドの発端となった1978年の国際調査にも十分な対応がとられなかったといわれている。

誤差あるいは精度の問題は極めて広範な問題で、これを根本的に解決するために作られたのがシステム計測研究室である。この研究室では、計測データの取得から処理という一般的な課題を扱ってきた。その中で柱になったのが、計測データを如何に取得するかという実験計画法の活用であり、対象を評価するための品質工学の活用である。計量研究所は品質工学におけるSN比の発祥から深く関わることになり、このような成果が、1992年の、SN比の方法を計測の誤差評価に活用したJISZ9090校正方式通則の制定へと繋がった。SN比は世界的な議論を巻き起こし、技術的な評価尺度として定着している。計測におけるパフォーマンスに関わる本研究はその流れの中に位置づけられる。

一方、1993年、「計測における不確かさの表現ガイド」が発表され、計測の信頼性評価の世界標準となろうとしている。不確かさガイドの考え方は物理的に存在する真の値を強く意識したものであり、それが不可知であるというあきらめから、ばらつきを評価することで代用しようというものであり、計量標準という物理的に確定的なものを強く意識したものである。実際には、SN比の方法も不確かさも、ばらつきとして現象を理解しようという点では同じ方向を目指しているといえることができる。

不確かさガイドは計測の信頼性評価の基本文書と見なされており、これに従って不確かさを伴った測定値の表記を行うことが世界的に要求されている。不確かさガイドはまだ概念的であり、不確かさを評価する方法にはいろいろなものが含まれるが、その中で、優位に立つものとしてSN比の方法を位置づけることができる。

1.7 本研究の目的と本論文の構成

本論文の構成は、図 1.7.1 に示した通りである。

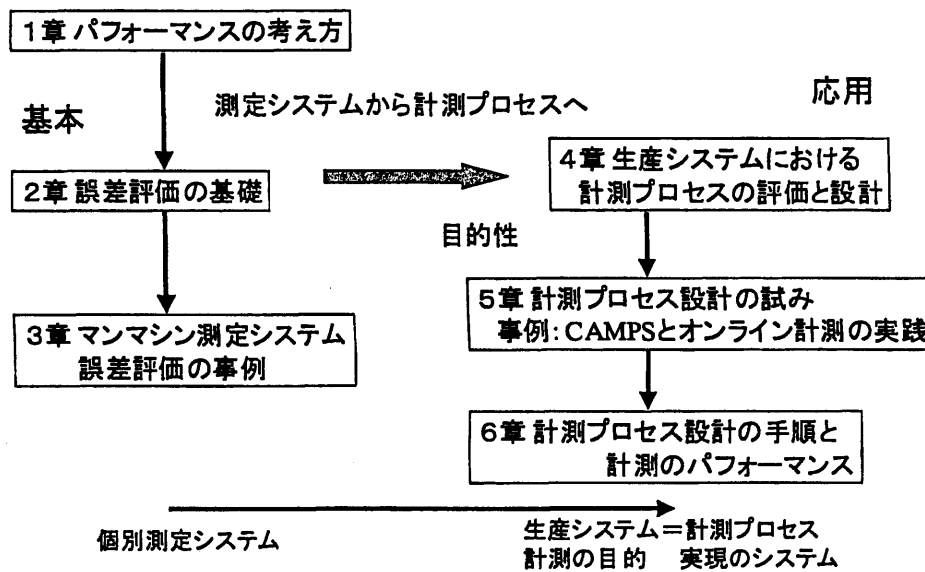


図 1.8.1 本論文の構成

すでに述べたように、本研究は、計測の果たすべき役割を明確にし、計測と測定が果たすべき機能を計測におけるパフォーマンスの立場から解明し、計測が生産活動に積極的に関わる方向を明らかにすることを目的とする。その中で、従来曖昧に使われてきた「計測」と「測定」の区別を明確にするとともに、その時系列的な一連の過程を「計測プロセス」「測定プロセス」、また、その中で活用されるハードウェアとソフトウェアの集合を「計測システム」「測定プロセス」と呼び、それらを設計する方法と評価する方法を明らかにする。

そのために、本論文の構成を次の様にする。

第1章では、本研究の背景となった計測に関わる問題とパフォーマンスの考え方の基本について述べた。

第2、3章では、計測の作業的な部分である測定システムのパフォーマンス評価を対象とする。

第2章では、測定システムの基本性能を表す誤差評価の方法として、計測の機能を評価

する測定のスN比の方法を定式化するとともに、従来の誤差評価方法との違いを明らかにするとともに、誤差評価の世界標準になると考えられる不確かさ評価の考え方の中での位置づけを明らかにする。

第3章では、測定を行うシステムとしてマンマシンシステムを取り上げ、人間が大きく関与する測定システムのパフォーマンス評価についての実施例について述べる。測定のマシシステムの一連の実験の中で、測定システムの中で測定者が果たす役割が大きい場合、測定システムのパフォーマンス評価が測定者に関わる要因によ変化することを明らかにする。

第4、5章では、計測プロセス全体を実施する計測システムのパフォーマンス評価を対象とする。

第4章では、計測の問題が生じ、測定を行い、問題を解決するまでの一連の過程である計測プロセスの構造を明らかにするとともに、パフォーマンス概念に基づいて、生産システムとの関連の中で計測プロセスの設計と評価について検討する。

第5章では、第4章で提案した計測プロセス設計の考え方を、プラスチック成形工程を対象に実験的に適用するために、オンライン計測プロセス設計のための一連の実験を行い、計測プロセス設計の有効性を実証的に検証した。

第6章では、今までに検討した測定と計測のプロセスをもとに、生産システムにおける計測プロセスの設計について、計測特性、評価指標の観点から検討し、設計の手順の形でまとめ、計測のパフォーマンス確保の立場を明らかにする。

第7章では、全体をまとめる。

第2章 測定システムの誤差の評価

計測の作業的な部分である測定システムのパフォーマンス評価の基礎となる誤差評価の方法を、測定の機能性評価の立場から明らかにする。測定の機能は測定対象量の真の値を測定値として推定することであり、精度良く推定を行うためには、測定量の変化に対応して測定値が変化することが必要である。測定に期待される機能を満たす程度を表す機能性は、測定の誤差により定量化される。測定誤差の大きさの定量化のために、誤差及びその評価の方法についての基本的な立場を明確にする。特に、SN比の方法による測定の機能性評価と其中で用いられている「校正」の概念を明らかにし、校正を前提にした測定の誤差の成分を明確にする。さらに、SN比の方法と従来の誤差評価手法、ISOの不確かさ表現ガイドの方法などとの関連を明らかにする。

2.1 測定における誤差の評価の考え方

「誤差」は、測定の信頼性評価のための、最も重要な評価尺度として使われてきた。それは、測定の結果が数値で表現され、その数値の正しさは直接的には誤差の値で表されるからである。

しかし、一般の測定においては、測定値によって「真の値」を推定しており、誤差を正確に知ることはできない。そのため、真の値をどのような形で推定するかが大きな問題であり、誤差を正しく求める方法について多くの議論を生み出すことになっている。

誤差評価の問題は、測定対象の真の値が不明であるにも関わらず、「誤差」あるいは「誤差の大きさ」を求めることが要求されていることである。ここで「誤差の大きさ」とは、個別の測定値の誤差ではなく、一定の条件の下で求められた測定値の集団が持つ性質である。誤差の大きさは平均二乗誤差あるいは分散の形で表現することができる。

測定の誤差を正確に知るためには、測定量の「真の値」が必要である。個別の誤差を知ることのできる数少ない例の1つが、ある範囲で真の値の分かった標準を測定する計測器の「校正」の場合である。すなわち、相対的に誤差の小さい標準の表示値を真の値と見なすことによって、誤差の大きさを推定することが可能である。校正の場合には、標準を測定することにより測定器の「器差」を求め、それが「かたより」であるとして補正するという形で修正が行われる。補正を行った場合には、器差は誤差とはならず、器差からの偏差分が誤差となる。このような補正は、測定のかたよりは系統効果により生じるもので、誤差の大きさに再現性があることを前提にした対処の方法である。

このような校正のための測定においては、標準の表示値を真の値の代用とすることにより、測定値の誤差を求めることができる。しかし、その場合でも、標準の表示値に誤差があることを考慮すれば、個々の測定値の誤差の値が正確であるということとはできない。また、トレーサビリティという概念のもとで、標準による校正のチェーンを明確にすることによって、標準の値の正確さを確保する試みが行われているが、おおもとの一次標準の定義を実現する系のばらつきがあり、さらに、それを下位の測定系に移転していくチェーンの中での個々の測定系がばらつきを持つ限り、トレーサビリティの各レベルでの標準の表示値が持つ誤差そのものの値を確定することはできない。

このような状況が、測定値の誤差の大きさを定量的に推定するために、統計的な手法を

活用することの基礎となっている。ここでいう「統計的」というのは、単に測定値が偶然的な要素によってばらつくという意味ではなく、予想される誤差原因と結果系である測定値の誤差との対応を、統計的な処理によって明確にすることができるという方法論をもっていることに基づいている。すなわち、統計的な処理によって、計測から得られる情報を最大限活用するために、計画的な実験を行うことが前提になる。ただ単に多数回の測定を行って測定値の平均とばらつきを機械的に計算するのではなく、現実の測定条件の変化を考慮した条件を「因子」として意識的に取り上げた実験計画による計測器の誤差評価実験を行うことが必要である。

一方、誤差の大きさそのものが、測定器に固有のものではなく、測定条件や管理条件によって変化し、一定ではないという性質をもっているため、測定誤差の研究を複雑にしている。従来、測定誤差は、それに使用した測定器により決まると考えられてきたが、測定誤差の研究が進む中で測定者、測定環境、測定対象等の条件により変化することが、定量的に示されている。例えば、時間的に連続して測定した場合のばらつきである繰り返し誤差は、時間的に間隔をおいて測定した場合のばらつきである反復誤差とは異なっている。短時間内の単純な複数回の測定の繰り返しデータで、いわゆる偶然誤差、あるいは、長時間のばらつき成分を求めることはできない。しかし、現実には繰り返し測定によって誤差評価あるいはばらつき評価をすることが一般的に行われている、という問題がある。

また、測定者の問題についての一連の研究の中で、測定者によりかたよりが異なる場合があるという事実がいわれていると共に、ばらつきの大きさも異なる場合があることが明らかにされている。更に、測定者によりかたよりが異なっている場合であっても、測定者の集団において発生する誤差を考えるならば、それを個々に補正しない限り、ばらつきとして評価しなければならない。

かたよるか、ばらつきかは、対象となる計測系の規定またそれを評価しようとする立場によって変わってしまう概念である。従って、測定誤差を定量的に求める場合、測定系からの誤差と考え、測定系そのものをどのようなものとして捉えるかを規定する必要があること、また、どのような種類の誤差成分を求めているかという立場を明確にしておくことが、誤差評価にとって重要である。統計的な用語で言えば、「評価の対象である母集団としてどのような測定システムを想定しているか」という問題である。

2. 2 測定のスN比

測定量を測定器の入力として考えた場合、入力の変化に応じて変化する測定器の「読み」が測定器の出力である。測定器の機能は、外部の測定量の変化に応じてその出力が変化するという動的なものである。すなわち、このような入出力の対応のよさを正しく評価することが、計測器の信頼性評価には必要である。

測定器の評価として、動的特性のスN比を適用したものが、「測定のスN比」である²⁻¹⁾。入力に応じて出力が変化するシステムを、動的特性のシステムと規定し、その性能を動的特性のスN比によって評価したものである。従来、ある一定の値を持つ測定量に対してかたよりとばらつきを評価するという静的な評価が誤差評価の中心であったのに対し、複数の測定量を利用して動的な入出力の対応性を誤差評価に用いる。動的という意味は、時間的に出力が変動するという意味ではなく、入力量の変化に対応して出力が変動するという意味である。測定のスN比を用いることによって、実際の測定点が評価に用いた標準の値からはずれたところであったとしても、合理的に誤差の大きさを評価することができる。

一般に、測定器は校正を行って使用される。校正とは、真の値の分かった標準を測定し、その読みを得ることによって、真の値と読みとの関係を求めることである。その関係は、一般には固定された一点における評価では器差という形で表現されるが、動特性の場合には関数という形で表現される。この関係を表す数式が校正式である。

測定においては、値が未知の測定量を測定し、測定器の読みを得たのち、読みの値を校正式を用いて計算することにより測定値が得られる。測定値は、測定量の真の値の推定値であり、測定システムの出力である。この意味で、測定器というハードウェアと校正というソフトウェアの組み合わせが「測定システム」である。

このような測定システムにおいて、最終的な結果である測定値と測定量の真の値との差が誤差である。誤差の大きさを推定する方法として、測定のスN比の計算方法を次のように導入することができる。

真の値Mが未知の測定量を測定したとき、測定器の読みyが得られた場合、それらの間の関係として、次のような一次式の間関係を考える。

$$y = m + \beta (M - \bar{M}) + e \quad (2.2.1)$$

ここで、eは読みyの持つ誤差で、測定ごとに変化する。また、m、 β 及び \bar{M} は校正式のパラメータで、これらは校正により求められていると仮定する。

読みyから測定値 \bar{M} を求める場合、個々の読みの誤差eの値は不明であるが、それをゼロであると仮定して、次のように計算する。

$$\bar{M} = \frac{y - m}{\beta} \quad (2.2.2)$$

測定値 \bar{M} は、この測定における真の値の推定値である。

一方、真の値Mは、(2-1)式をMについて解くことで次のように表される。

$$M = \frac{y - m}{\beta} - \frac{e}{\beta} = \hat{M} - \frac{e}{\beta} \quad (2.2.3)$$

誤差をその定義「測定値から真の値を引いた値」に従って求めると、

$$\begin{aligned} \text{誤差} &= \hat{M} - M \\ &= \frac{e}{\beta} \end{aligned} \quad (2.2.4)$$

となる。誤差の大きさを表す分散は次のようになる。

$$V[\hat{M} - M] = E\left[\left(-\frac{e}{\beta}\right)^2\right] = \frac{\sigma_e^2}{\beta^2} \quad (2.3.5)$$

ここで、 σ_e^2 は読み y の分散である。

誤差の大きさを表す分散である(2.2.5)式は、この計測器を既定の方法で校正して測定に使用したときの測定値の分散を表しており、「校正後の誤差分散」と呼ぶ。測定のSN比は、この分散の逆数を取り、計測器の良さを表すようにしたものである²⁻²⁾。

校正後の誤差分散は、表 2.2.1 に示すような実際のデータから次のように推定する。

表 2.2.1 誤差評価の実験の配置

	M_1	M_2	M_k
N_1	y_{11}	y_{21}	y_{k1}
N_2	y_{12}	y_{22}	y_{k2}
.....
N_n	y_{1n}	y_{2n}	y_{kn}

校正における測定の作業において、標準 M_i ($k = 1, 2 \dots k$) をそれぞれ n 回測定し、読み y_{ij} ($i = 1, 2 \dots k, j = 1, 2 \dots n$) を得る。今、ここでは、 n 回の繰り返し測定の状態については議論しない。

標準の値 M と読み y の関係を表す校正式を 1 次式で表す。この場合、直交多項式の形で表現すれば、

$$y = m + \beta (M - \bar{M}) \quad (2.2.6)$$

である。

校正とは、この場合、上式のパラメータ m と β を推定する作業である。パラメータの推定においては、誤差分散が最小になるように、最小二乗法に基づいた推定を行うことが一般的である。この推定は、校正式による真値の推定値、すなわち、測定値の誤差の分散が

最小となる推定である。最小二乗法の計算により、次のパラメータを推定する。

$$\hat{m} = \frac{1}{nk} \sum \sum y_{ij} \quad (2.2.7)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\sum \sum (M_i - \bar{M}) y_{ij}}{n \sum (M_i - \bar{M})^2} \quad (2.2.8)$$

このときの測定のSN比は回帰分析の手法を用いることによって、次のように回帰分析のパラメータを求めることができる。

有効除数

$$r = n \sum (M_i - \bar{M})^2 \quad (2.2.9)$$

回帰変動

$$S_\beta = \frac{[\sum \sum (M_i - \bar{M}) y_{ij}]^2}{n \sum (M_i - \bar{M})^2} \quad (2.2.10)$$

総変動

$$S_T = \sum \sum (y_{ij} - \bar{y})^2 \quad (2.2.11)$$

誤差分散

$$V_e = \frac{1}{nk - 2} (S_T - S_\beta) \quad (2.2.12)$$

これらを用いてSN比 η の値を次のように推定する。まず、読みの分散 σ_e^2 は誤差分散 V_e で推定する。また、 β^2 は一次回帰変動 S_β の期待値から直接に推定する。すなわち、一次回帰変動 S_β の期待値は次のようになることから、

$$E(S_\beta) = \sigma_e^2 + \beta^2 n \sum (M_i - \bar{M})^2 \quad (2.2.13)$$

これを β^2 について解いてもとめる。

$$\beta^2 = \frac{S_\beta - V_e}{n \sum (M_i - \bar{M})^2} = \frac{S_\beta - V_e}{r} \quad (2.2.14)$$

ここで、 $r = n \sum (M_i - \bar{M})^2$ は有効除数である。

従って、複数の標準 M を測定したとき、読み y の回帰分析を行い、一次回帰変動を S_β 、読みの誤差変動を V_e とすれば、測定のSN比 η は次のように計算される。

$$\eta_e = \frac{\frac{1}{r} (S_\beta - V_e)}{V_e} \quad (2.2.15)$$

回帰分析では、測定対象量を信号と考え、データの変動を、信号による有効な変動とそれ以外の要因による無効な変動とに分解しており、その結果を用いてSN比を推定することができる。測定のSN比は、概念的には、信号による有効なデータの変動の、データの無効な変動に対する比を表しており、通信や音響の分野で広く使われている「SN比」と

実質的に同じ内容を持つ。

測定のSN比は、測定システムに対して校正という最適化操作を行うことを前提にした性能評価の指標となっている。すなわち、標準があればかたよりは修正できることを前提にして、校正式により測定範囲全体でできるだけ誤差が小さくなるような対策をとったときの性能指標である。それによって、実際の校正作業は行わず、校正を行った後の誤差分散を計算により求めることができる。校正式の形を仮定したとき、その校正式のもとで校正を行った場合の測定値の誤差分散の大きさを求めることが可能である。SN比で評価されているものは、図 2.2.1 に示すように、校正により全体的なかたよりを補正した後に残る測定のばらつきである。従って、計測上での概念としては、測定のSN比は、ある校正式を採ったときの測定の基本性能である誤差の大きさを分散の形で表す指標である。

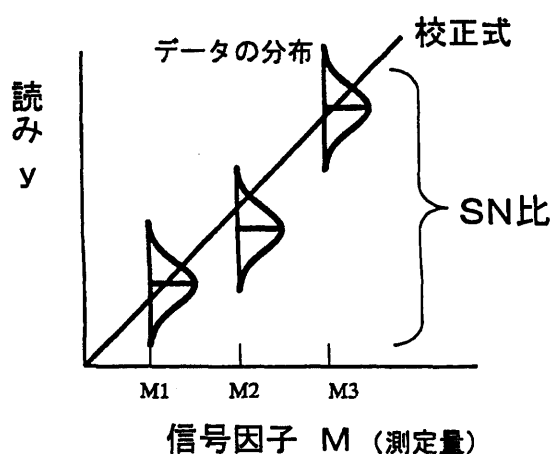


図 2.2.1 校正式とSN比

誤差評価の基本的な立場としては、測定の条件が与えられた状況の中で誤差分散を求め、誤差の大きさを推定することが重要である。例えば、あるデータの回帰分析を行い回帰式を当てはめたとき、2次成分が大きいからといって、2次式を回帰式として採用しなければならないわけではない。誤差の大きさが大きくなるとしても、それを承知で利用するならば、1次式による表現で十分な場合がある。2次式を用いた場合であっても、1次式を用いた場合であっても、いずれの場合の誤差の大きさも推定できることが必要である。

SN比を評価する立場から言えば、基本的にSN比は加法性の評価を行っており、測定量の真の値が分からなくても、測定量の相対的な関係が明確になるような信号として設定を行うことによって評価可能である。有効除数の式を見て分かるように、 $(M_i - \bar{M})$ という形で信号の水準の相対的な関係が評価に使われていることから、例えば、信号の水準を等間隔 h で設定できるならば、間隔 h を単位としたSN比を求めることができる。間隔 h が正確にわかれば、測定量を単位にしたSN比に変換することが可能である。このような加法性をうまく利用すれば、絶対値的な意味での真の値がない場合であっても、誤差の大きさの評価が可能になる。この加法性を用いた評価は、動特性のSN比の方法の第一の特徴である。

また、SN比を評価するに当たって、単に測定の繰り返しや反復という偶然性に左右さ

れる条件を因子に取り上げるのではなく、ばらつき原因である条件を誤差因子として積極的に取り上げてSN比を評価する。偶然誤差に頼るのではなく、意図的に条件をばらつかせることによって、誤差評価を確実なものにし、SN比をより現実的な指標とすることができる。誤差因子の活用はSN比の方法の第二の特徴である。

測定のSN比によって測定法を比較する立場から言えば、校正を前提にしていることから、測定の原理が異なり、読みの単位が異なる場合であっても、同じ測定量の単位での比較がSN比により可能である。

測定のパフォーマンスの検討を進める基本を、測定の基本的な性能を示す測定のSN比による評価に置く。

2.3 校正を前提にした測定の誤差の成分の分解

前項に述べたように、測定の基本的な性能は測定のSN比 η で代表される。しかし、SN比がそのまま測定値の誤差の大きさを直接的に表現する訳ではない。計測器を標準によって校正し、実際の測定対象（以下実物という）を測定する場合、そのそれぞれのプロセスにおいて誤差が加わる。すなわち、標準の値付け、校正作業、実物測定という作業のプロセスに応じて、校正に用いる標準の表示値の誤差、計測器の校正作業の誤差、さらに、実物の測定の誤差が計測の誤差に含まれると考えられる。それぞれの誤差の大きさを分散の形で表し、分散の独立性と加法性を仮定すれば、次のように表される²⁻³⁾。

$$\sigma_{\tau}^2 = \sigma_m^2 + \sigma_c^2 + \sigma_a^2 \quad (2.3.1)$$

ここで、

σ_{τ}^2 : 計測の誤差の大きさを表す誤差分散

σ_m^2 : 校正に用いた標準の表示値の誤差の大きさを表す誤差分散

σ_c^2 : 校正作業の誤差の大きさを表す誤差分散

σ_a^2 : 実物測定の誤差の大きさを表す誤差分散

である。

それぞれの成分の大きさは以下のように求めることができる。

前項で述べたように、測定の結果である測定値 \hat{M} は測定の読み y を用いて

$$\hat{M} = \frac{y - \hat{m}}{\beta} \quad (2.3.2)$$

で推定する。しかし、校正作業、すなわちパラメータ m 、 β の推定値 \hat{m} 、 $\hat{\beta}$ を求めるための測定作業にも誤差があるため、

$$\hat{M} - M = \frac{y - \hat{m}}{\hat{\beta}} - \frac{y - m}{\beta} \quad (2.3.3)$$

は、測定値の誤差のうち、パラメータの誤差による成分を表している。すなわち、この値は、パラメータの推定を行う校正作業における誤差の影響の大きさを表していることになる。

校正作業による誤差成分は次のようになる。ただし、 m 、 β のパラメータの推定値は、表2.2.1の形で得られたデータから最小二乗法で求められたものである、

$$\begin{aligned} \hat{M} - M &= \frac{y - \hat{m}}{\hat{\beta}} - \frac{y - m}{\beta} \\ &= \frac{y - (m + \Delta m)}{\beta + \Delta \beta} - \frac{y - m}{\beta} \\ &= \frac{y - m \left(1 + \frac{\Delta m}{m}\right)}{\beta \left(1 + \frac{\Delta \beta}{\beta}\right)} - \frac{y - m}{\beta} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\doteq \frac{y-m \left(1 + \frac{\Delta m}{m}\right)}{\beta} \left(1 - \frac{\Delta \beta}{\beta}\right) - \frac{y-m}{\beta} \\
&= \frac{-\Delta m}{\beta} - \frac{y-m \left(1 + \frac{\Delta m}{m}\right)}{\beta} \cdot \frac{\Delta \beta}{\beta} \\
&\doteq \frac{-\Delta m}{\beta} - \frac{y-m}{\beta} \cdot \frac{\Delta \beta}{\beta} \\
&= \frac{-\Delta m}{\beta} - (M-\bar{M}) \frac{\Delta \beta}{\beta}
\end{aligned} \tag{2.3.4}$$

ここで、 Δ の2次項は小さいとして省略した。

この成分の分散は次のようになる。

$$\begin{aligned}
V[\bar{M}-M] &= \frac{1}{\beta^2} (\Delta m)^2 + (M-\bar{M})^2 \frac{(\Delta \beta)^2}{\beta^2} \\
&= \frac{1}{\beta^2} V[m] + \frac{(M-\bar{M})^2}{\beta^2} V[\beta]
\end{aligned} \tag{2.3.5}$$

ここで、

$$V[m] = V\left[\frac{1}{kn} \sum_{i,j}^k \sum^l y_{ij}\right] = \frac{\sigma^2}{kn} \tag{2.3.6}$$

$$\begin{aligned}
V[\beta] &= V\left[\frac{\sum \sum (M_i - \bar{M}) y_{ij}}{n \sum (M_i - \bar{M})^2}\right] \\
&= \frac{[n \sum (M_i - \bar{M})^2]}{[n \sum (M_i - \bar{M})^2]^2} \cdot V[y_{ij}] \\
&= \frac{\sigma^2}{n \sum (M_i - \bar{M})^2}
\end{aligned} \tag{2.3.7}$$

である。これを上式に代入し、整理すると次のようになる。

$$\begin{aligned}
\sigma_c^2 &= \frac{1}{\beta^2} \cdot \frac{\sigma^2}{kn} + \frac{(M-\bar{M})^2}{\beta^2} \cdot \frac{\sigma^2}{n \sum (M_i - \bar{M})^2} \\
&= \frac{1}{kn} \frac{\sigma^2}{\beta^2} + \frac{(M-\bar{M})^2}{n \sum (M_i - \bar{M})^2} \cdot \frac{\sigma^2}{\beta^2} \\
&= \left(\frac{1}{kn} + \frac{(M-\bar{M})^2}{n \sum (M_i - \bar{M})^2}\right) \frac{\sigma^2}{\beta^2} \\
&= \left(\frac{1}{kn} + \frac{(M-\bar{M})^2}{n \sum (M_i - \bar{M})^2}\right) \frac{1}{\eta_c}
\end{aligned} \tag{2.3.8}$$

ここで、校正作業における測定の読みの分散を σ^2 で表し、校正作業における測定のSN比を η_c で表した。校正作業における測定は、標準を対象としたものであることから、実物測定のSN比 η と異なる場合もある。両者を区別するために、校正の場合には添字cを用いている。

一方、標準の表示値が持つ誤差の影響を考える。

標準の表示値は上位の計測器を用いて測定することによって与えられる。もし、上位の

計測器による標準 M_i の値付けに誤差 $\Delta M b_i$ があるとすれば、個々の標準の表示値は $\Delta M b_i$ の誤差を持つ。それは個々の標準によって異なる。最終的な校正式において、標準の値の平均値 \bar{M} に対して、 $\Delta M b_i$ の平均値の分だけがかたよりとして影響するが、上位の計測器が標準に対して適切に校正されているとすれば、かたより $\Delta M b_i$ の大きさの期待値はゼロであると考えることが出来る。また、上位の計測器による測定のかたよりがあり、期待値がゼロでない場合であっても、一次式の校正では平均値からの偏差 $(M_i - \bar{M})$ が使われており、その式の中では上位の計測器による測定のかたよりはキャンセルされる。

一方、上位の計測器のばらつきはそのまま標準の表示値のばらつきとなる。ばらつきはその値を知ることができないため、修正不可能である。標準の表示値のばらつきは、上位の計測器の測定のSN比によって表される。

標準の表示値の誤差による分散成分 σ_m^2 を、標準の値づけに用いた上位の測定器の測定のSN比 η_u で表す。すなわち

$$\sigma_m^2 = \frac{1}{\eta_u} \quad (2.3.9)$$

とする。

一般に、校正に用いる標準の誤差は、1桁小さいことが望ましいといわれている。1桁小さいということは分散で1/100となり、その表示値の誤差が測定誤差に与える影響は小さい。

以上のように、個々の成分を求めることができる。標準の表示値の誤差、校正作業の誤差、実物測定の誤差は独立に生じる誤差であるから、分散の加法性を用いて測定値の誤差分散を次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \sigma_r^2 &= \sigma_m^2 + \sigma_c^2 + \sigma_a^2 \\ &= \sigma_m^2 + \left(\frac{1}{kn} + \frac{(M - \bar{M})^2}{n \sum (M_i - \bar{M})^2} \right) \frac{\sigma_c^2}{\beta c^2} + \frac{\sigma^2}{\beta^2} \end{aligned} \quad (2.3.10)$$

SN比の形にすれば、

$$\frac{1}{\eta_r} + \left(\frac{1}{kn} + \frac{(M - \bar{M})^2}{n \sum (M_i - \bar{M})^2} \right) \frac{1}{\eta_c} + \frac{1}{\eta} \quad (2.3.11)$$

となる。

上の式の右辺第2項の係数は校正式として一次式を用いた場合のものである。この係数は、一次式のパラメータ m 及び β のデータからの推定に伴うもので、校正式が異なれば、パラメータの推定式が異なり、係数も異なる。

以上の展開の中で、

- ①校正に用いる標準と実物とでは読みの誤差分散が異なる場合があること、
 - ②測定値の誤差は校正方法によって変化すること、
- が明らかにされた。

前者について言えば、一般に、標準は、その形態が安定したものとして設定されるが、

実際の測定対象である実物の形態は様々である。例えば、ノギスのような寸法測定器において、校正に使用されるのは一般にブロックゲージであるが、実物としては、ゴム、プラスチック、材木、鉄鋼など広範囲に渡る可能性がある。この場合、実物測定のSN比 η は、測定対象である実物によって、その値が異なると考えられる。多くの場合、SN比 η と校正作業のSN比 η_c は一般には異なる値を取る。測定の誤差評価において、実物測定のSN比を如何に評価するか、は誤差評価の中心的な課題である²³⁾。

従来、測定の誤差を測定器の誤差として求めることは一般に行われてきた。しかし、上式右辺第2項で明らかのように、その測定器をどのように校正するか、によって変化する。このような校正の方法を体系化したものを「校正方式」と呼ぶことにする。校正方式の内容は次のような事項が含まれる。

- 1) 校正に用いた標準の値付け
- 2) 標準の水準数及び水準値
- 3) 校正式の種類
- 4) 校正の時間的間隔（校正周期ともいう）

SN比による測定の機能の評価は、それが使われる測定システムが規定されれば、計測器の評価ではなく、総合システムとしての測定システムの機能評価になる。校正を含めた測定システムの機能としては(2-25)式の誤差成分の分散の和として表現される。校正方式の内容により係数が決定され、全体が明らかされる。

したがって、SN比による誤差評価の中心的な課題は、

- ①校正を含めた測定システムの規定
- ②規定された測定システムのSN比 η の評価

の2点を明らかにすることである。そのための方法は、JISZ9090 校正方式通則の中で具体的な手順としてまとめられている。このJISは、ここで述べたSN比の方法をもとにしているが、この規格で特徴的なことは、校正方式を決めたときに、その測定システムを評価すべきことを明確にしたこと、誤差評価をデータに基づいて行う方法を明確にしたこと、総合判断に損失関数を用いた経済性の概念を導入したこと、標準の誤差の影響を明確にしたこと、である。JISが発行された1993年当時、標準に誤差があり、それをきちんと表記するということが一般的ではなかった。

2. 4 他の誤差評価手法の考え方

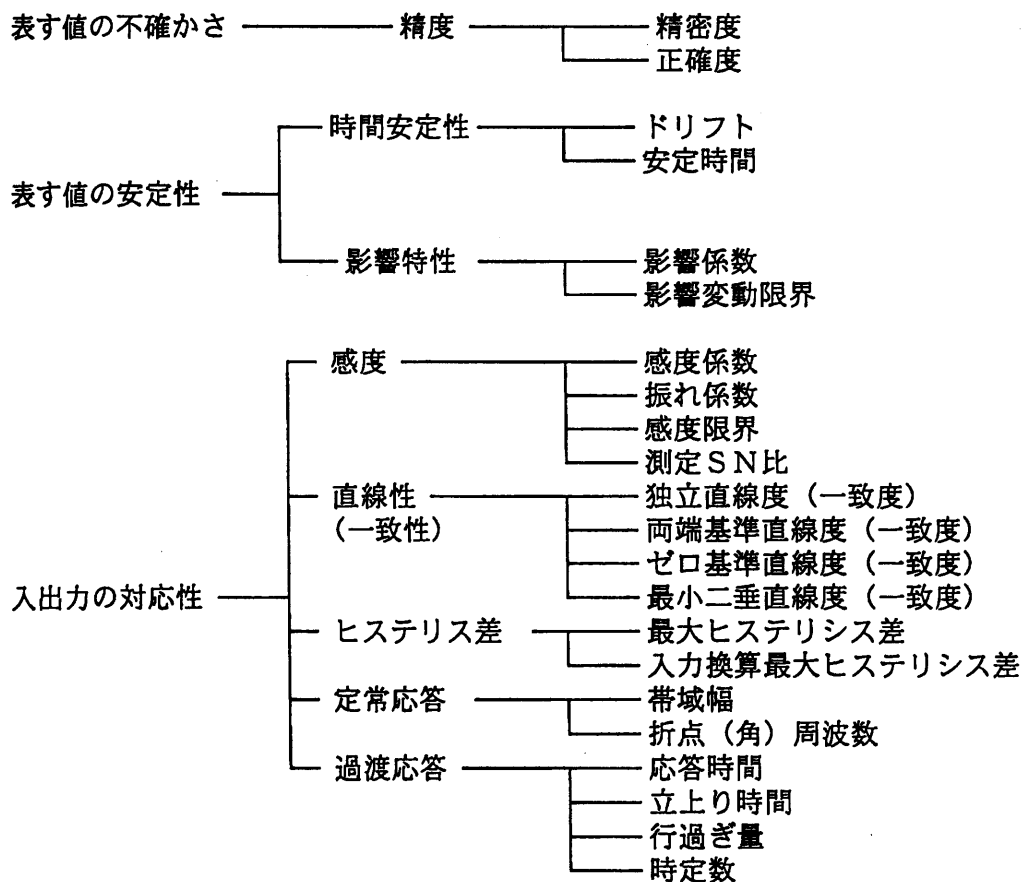
ここでは、従来の誤差評価の代表である性能通則及びこれからの誤差評価の表示方法の代表である不確かさのガイドの考え方を検討する。

2. 4. 1 従来の測定誤差の考え方－性能通則

統計的な面での検討に基づいた JIS の原案「計測器の性能通則（精度に関するもの）」（以下、性能通則という）は、機械計測分野での古典的な誤差評価の方法を集大成したものである²⁻⁶⁾。しかし、この原案は、作成された 1978 年当時の日本においてはまだ受け入れられるものではなく、業界の反対にあって最終的には廃案となり、規格化されなかった。また、計量研究所においても、誤差評価を行うことが一般的ではなく、強力なサポートもなかった。

性能通則では、性能の表示を、その対象と目的によって、個別性能と保証性能に分ける。個別性能は、個々の計測器について評価された性能であり、成績書等に記載される。保証性能はある指定された形式の計測器のメーカ、あるいは検査機関が保証する性能でありカタログや工業規格等に規定される。更に測定器の性能を表わす項目としては表 2.4.1 のものをあげている。

表 2. 4. 1 性能の項目（性能通則原案²⁻⁶⁾による）



この性能通則は、誤差の古典論、すなわち、誤差には「かたより」と「ばらつき」があり、それを系統誤差と偶然誤差に対応させ、総合的な誤差としての「精度」を定量化する試みである。この方法は、①測定量一定の固定点で、②測定量の真の値に相当する標準値が得られる、ことを前提にした評価になっている。この前提のもとでは、もっともまとまった考え方であったといえる。

性能通則は、正確度と精密度を 95%の信頼限界の値として表現しており、それぞれの数値の持つ統計的な観点からの意味を明らかにした点で、それ以前の誤差評価の方法を一步進めたものである。

しかし、前に述べたように、本来測定量はある範囲に広がるものであり、固定点での評価だけでは不十分である。また、機械・物理計測分野では、比較的容易に真の値を想定することができ、かたよりを定量化することは容易であると考えられてきた。しかし、現実の測定において、標準の測定では真の値の設定はある誤差範囲で可能であるかもしれないが、実物の測定においては実物の真の値を決めることは必ずしも容易ではない。

2. 4. 2 新しい「誤差の大きさ」の表記方法 - 不確かさの考え方

1993年に国際標準化機構(ISO)から「計測における不確かさの表現のガイド」²⁴⁾(以下、不確かさ表現ガイドという)が出版されたのがきっかけに、計測の信頼性を測定の不確かさとして表記する方法が一般的になりつつある。

不確かさ表現ガイドでは、従来の「誤差」という概念ではなく、「不確かさ」という概念によって測定の信頼性を定量化する。「測定値の真の値からの差」という「誤差」の定義は、測定量の真の値が分からなければ個々の測定値の誤差は分からないという計測の宿命を背負っているが、「不確かさ」を次のように定義することによって、真の値を想定せずに測定値の信頼性を定量化しようとしている。

不確かさ表現ガイド及び VIM 第2版²⁻⁹⁾では、「(測定の)不確かさ」を次のように定義している。

(測定の)不確かさ [VIM 3.09]

測定の結果に付随した、合理的に測定量に結びつけられ得る値のばらつきを特徴づけるパラメータ。

注：

- 1 このパラメータは、例えば標準偏差(またはそのある倍数)であってもよく、あるいは信頼の水準を明示した区間の半分の値であってもよい。
- 2 測定の不確かさは一般に多くの成分を含む。これらの成分の一部は、一連の測定の結果の統計分布から推定することができ、実験標準偏差によって特徴づけられる。その他の成分は標準偏差によっても特徴づけられるが、経験または他の情報に基づいて確率分布を想定して評価される。
- 3 測定の結果は測定量の値の最良推定値であり、不確かさの成分は補正や参照標準に付随する成分のような系統効果によって生ずる成分も含んでおり、すべてばらつきに寄与する、と理解される。

VIM 第1版(1984)では、「不確かさ」は「ある測定量の真の値が存在する範囲を示す推定値」と定義されていたが、VIM 第2版では、不可知である「真の値」の存在を前提にした理念的なものから切り離れた形での定義を採用した。「合理的に測定量に結びつけられ得る値」は、近似的には測定量によって変化する測定の結果すなわち測定値に相当する。この場合の測定値は必要な補正などのデータ処理を行った後の値である。

この定義に付記された注は不確かさの定量化の指針の要約にもなっている。また、注の3で述べているように、偶然効果、系統効果いずれも「すべてばらつきに寄与する」という考え方は、不確かさの成分の評価や合成のための基礎を与えている。

不確かさのガイドでは、不確かさの成分を、それを評価する方法によって分類する。不確かさを表す標準偏差(あるいはそれに準じたもの)を定量的に求める方法を、勧告 INC-1(1980)に従って、統計的な方法とそれ以外の方法の二つに分類している。

Aタイプの評価：一連の観測値の統計解析による不確かさの評価の方法。

Bタイプの評価：一連の観測値の統計解析以外の手段による不確かさの評価の方法。

不確かさの成分も、それに対応して、Aタイプの成分、Bタイプの成分という形で表現される。このような分類は、不確かさ成分の大きさを表す標準偏差を求めるにあたって、測定値の分布を、実際の観測値の度数分布から求めるか、あるいは、経験に基づいた先験的な分布を仮定するかの違いに相当する。いずれの成分であっても、その分布の広がりの特徴づける標準偏差によって「不確かさ」を定量化する。

従来の誤差評価の方法としては、誤差の成分を、偶然誤差=ばらつき、系統誤差=かたより、というように、誤差の原因あるいは測定値に対する影響の仕方によって分類することが一般的であった。それに対し、不確かさ表現ガイドは、評価方法によって分類することによって、不確かさの評価の道筋を明確に説明しようとするものである。

すなわち、観測値の誤差成分のかたよりとばらつきへの分類は一義的に決められるものではなく、時間的・空間的に評価の立場が変わると変化するものである。例えば、ある時点でのかたよりも時間がたてば変化するものであり、かたよりの時間変化はばらつきの一つである。読み取りの個人差も、測定者を限定すればかたよりのように見えるが、多くの測定者の集団の中ではばらつきとして現れる。また、観測値に対する温度の影響のように誤差原因が明確なもので、系統誤差といえるものであっても、補正をしなかったり、誤差原因として見逃してしまえば偶然誤差のように見えることもある。逆に、現在偶然効果として認識されているばらつきも、測定システムの研究が進み原因が特定されれば、系統効果として分類されることもあり得る。不確かさガイドでは、評価対象あるいは評価者の立場に依存する原因の影響の仕方による分類方法ではなく、一義的に決められる評価の方法による成分の分類が採用された。

個々の測定の不確かさ評価においては、これらの誤差原因を具体的に数え上げ、検討することになる。その際、それぞれの成分をAタイプ、Bタイプのどちらに振り分けるかは、評価者がどのような評価方法を採用するかによって決まる問題であり、その分類がはじめてから

決められているわけではない。一般的には、現場に近い測定の評価においては、Aタイプの統計的な評価で十分な場合が多くなると考えられる。

Aタイプの評価は、実際のデータをベースにした評価であり、ある程度の客観性を持っているが、Bタイプの評価は、勧告 INC-1(1980)についての作業部会の報告²⁻¹⁰⁾のいうように、"estimate"(推定する)ではなく、"guestimate"が近く、かなり主観的な評価になる可能性を持っている。

不確かさ表現ガイドでは、求められた不確かさの成分の合成の方法として、不確かさの伝ば則を用いた分散の合成方法に限定している。

不確かさガイドでは、測定値Yに影響を与えるパラメータをすべて入力量と考えたモデルを考える。入力量には、直接に測定する量、校正に用いた標準の値、測定器の表示値に系統的な影響を与える影響量、系統効果を補正するための補助測定量、物理定数などがある。出力量Yは測定量であり、次のような関数fによって入力量X₁と関連づけられている。

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2.4.1)$$

これが、不確かさ評価の基礎となる関数モデルである。

すべての入力量は確率変数であると考え。すなわち、入力量はある値のまわりにばらついており、そのために出力量である測定値がばらつくと考え。

一般に、入力量X₁の真の値は不明であり、測定量Yの推定値yを求める場合には、入力量X₁の推定値x₁が用いられ、推定値yの不確かさの推定には、推定値x₁の不確かさが用いられる。

すなわち、測定量Yの測定の結果yが、複数の入力量の推定値x₁から、

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (2.4.2)$$

の関数によって計算されるとすると、yの合成標準不確かさu_c(y)の二乗は、次のように、独立な不確かさ成分の標準不確かさu_i(y)の二乗和で表す。

$$u_c^2(y) \equiv \sum u_i^2(y) = \sum [c_i u(x_i)]^2 \quad (2.4.3)$$

ここで、

$$u_i(y) \equiv |c_i| u(x_i), \quad c_i \equiv \partial f / \partial x_i \quad (2.4.4)$$

である。重みc_iは、関数fの偏導関数で、感度係数とも呼ばれ、入力量が測定値yに与える影響の大きさを表している。(2.28)式は、Y = f(x₁)の関数の1次のテイラー級数近似に基づいており、不確かさ表現ガイドでは、入力値に相関のない場合の「不確かさの伝ば則」と呼ばれ、不確かさ成分の合成の基礎となっている。不確かさの伝ば則は、不確かさ成分の分類によらず適用可能であり、Aタイプ成分もBタイプの成分も同等に扱うことができる。

測定の結果としては測定値及び標準不確かさが記述されれば十分であるが、測定値の存

在する区間を表現する実用的な尺度として拡張不確かさ U の記述が求められている。拡張不確かさは、単に、測定の結果（測定値）がある確率（信頼の水準：level of confidence）で、区間 $[y-U, y+U]$ 内に存在するということの表明であり、その区間内に真の値が存在するというようなことは想定されていない。その意味で、統計用語としての、母数（真の値）の存在区間を推定した「信頼区間」あるいはその確率に相当する「信頼水準」とは、考え方が全く異なっている。しかし、測定のプロセスが妥当であれば、真の値が拡張不確かさの範囲に存在していると考えすることは現実的である。

合成標準不確かさから拡張不確かさへの変換は、次のような関係式が用いられる。

$$U = k u_c \quad (2-30)$$

ここで、信頼の水準を反映する係数として「包含係数」(coverage factor) k が使われている。この用語は「保証係数」と訳されている場合があるが、拡張不確かさが何かを保証しているわけではないことから、この訳の方がより適切である。

不確かさ表現ガイドでは、包含係数 k として $k=2 \sim 3$ の値を取ることを推奨している。測定値の分布が正規分布であることを仮定すれば、信頼の水準の確率 $p=95 \sim 99$ (%)に相当する。統計的には、包含係数 k は $y \pm U$ で決められる区間に測定値が存在するであろう確率 p (信頼の水準)と合成標準不確かさの有効自由度 ν に対応する t 分布に基づいて決められる。しかし、それが有効なのは測定値が正規分布しているという仮定が成り立つときであり、実際の測定値の場合にはその仮定は必ずしも成立しない。その意味で、厳密に言えば包含係数 k と信頼の水準 p の関係は不明である。特に、 $p=1$ に近いところでは、分布の裾の方の形に大きく依存するため、不確かさが大きくなり、この関係を精密に求める努力はあまり報われない。不確かさ表現ガイドにおいて、付録では厳密な統計的検討が行われているが、本文では $k=2 \sim 3$ を選択するというような曖昧な表現になっている。統計の専門家からその曖昧さに批判があるようだが、分布の情報が不十分なまま、数式上の厳密さを追求しても限界があると考えられる。

一般的には、 $k=2$ を採用し、ほぼ $p=95$ %に相当すると考えて拡張不確かさを表記することを約束しておけば十分ではないかと考えられる。拡張不確かさの数値を用いる場合には、統一性を求めるために包含係数 k の値を明記する、という方針が取られている。

2. 5 硬さ試験の誤差評価への不確かさ表現ガイドの適用

ここでは、誤差評価のためのデータへの不確かさ表現ガイドの方法の適用を行い、不確かさガイドの考え方について検討を行う。

不確かさ表現ガイドでは、測定値のばらつきを表わす不確かさを測定の信頼性を表わす指標として用いる。不確かさの評価の中で、

①不確かさ成分を統計的方法及びその他の方法でばらつきの大きさとして評価する。

②不確かさ成分を分散の合成則を用いて合成する。

という特徴をもっている。不確かさを定量的に評価するということは、測定値のばらつきを表わす標準偏差を求めることになるが、「独立なデータ」から標準偏差を求めるとしている。しかし、不確かさ表現ガイドの中では詳しくは述べられていないが「独立なデータ」をいかに取得するかが、一番の問題である。データの質によって不確かさの数値の信頼度が決まる。できるだけ系統的にデータを取得するためには実験計画法の活用が不可欠である。これから述べる NFOAD 実験は活用されるべき実験計画法の一つである。ここでは、誤差因子を直交表 L_{16} にわりつけた実験計画として NFOAD (Noise Factor Orthogonal Array Design) という配置の活用を提案し、ロックウェル硬さ測定の不確かさ評価に適用した。

2. 5. 1 誤差因子をわりつけた直交表実験 (NFOAD)

不確かさの評価において、入力量の標準偏差に感度係数を乗じて測定量の次元の標準偏差に変換する。これは、測定値の数学モデルで線形近似を行って原因系のばらつきから測定値のばらつきを評価していることに相当する。不確かさ表現ガイドの中でいう数学モデルの入力量となるのは測定のパラメータであるが、このパラメータが現実の場でばらつくことによって測定値がばらつく。すなわち、系統効果の原因系が入力量である。SN 比の方法では誤差因子あるいはノイズ因子と呼ばれるものに相当している。入力量に関して、その効果を調べ直線近似を行うことが必要になる。直線近似の感度係数と誤差を表わす残差を求めるためには、入力量について最低 3 水準の実験を行う必要がある。水準数を増すことは線形モデルの精密化には役に立つが、現実には、一つの変数のモデルの精密化を図ることよりは、複数の誤差因子をとりあげた実験計画によって多くの誤差因子の影響を調べることの方が効率的であり、有効である。

ここでは、因子の影響を調べ、現実的な誤差の大きさを求めるための配置として、直交表に複数の誤差因子をわりつけた計画である NFOAD 配置の活用を提案する。NFOAD 実験では、次のような方法を探る。

①複数の誤差因子を 1 つの直交表にわりつける。

②誤差因子は基本的には 3 水準とする。

③水準の幅は実際のばらつきの程度にする。

④必要に応じて信号因子をわりつける。

この実験で得られたデータは分散分析され、定量的な因子に対しては、因子の効果は回帰項と残差項に分割して、計算される。それによって、直線近似の回帰式、すなわち感度係数の値と回帰式からのはずれの大きさ、すなわち、回帰のあてはめの悪さを知ることが可能である。

また、直交表にわりつけて複数の誤差因子を同時に実験することは、単に実験を効率化

するだけでなく、他の誤差因子に対して水準間を平均化した形で、一般化された回帰式が用いられることになる。ある特定の誤差因子で一因子実験をした場合、他の誤差因子は固定されており、交互作用を見逃がす可能性もある。

この実験計画は、JISZ9090 校正方式通則の付属書 2 のなかで、実物測定の誤差の大きさを実験により求める方法として規定されているもので、品質工学の許容差設計の実験計画を活用したものである。そこでは、誤差因子の設定幅を変化させたときの誤差の分散を推定する方法として利用されているが、ここでは、同じデータを不確かさ表現ガイドの解析方法に沿って解析することとした。すなわち、誤差因子の感度係数を求めるための実験と位置づけ、不確かさ表現ガイドに従って解析を行った。

2. 5. 2 ロックウェル硬さ試験とその誤差要因

ロックウェル硬さ試験は材料の強度を測定するために、広く工業界で使われている。この硬さ試験では、決められた荷重を圧子に負荷したときの圧子の押し込み深さ h が直接的には測定され、硬さ値は次式によって計算される。

$$HR = K - k h \quad (2.5.1)$$

ここで、定数 K 及び k は、基準荷重、試験荷重、圧子形状などの試験条件が決められたときに決まる定数である。理論的には、押し込み深さは材料の表面からの長さとして測定されるが、実際には、圧子が材料表面に接触した状態を検知することは難しい。従って、硬さ試験の場合の押し込み深さは、小荷重である基準荷重を負荷したときの圧子先端の位置 h_1 と試験荷重を負荷したときの位置 h_2 との差として定義される。すなわち、押し込み深さ h は次式で計算される量である。

$$h = h_2 - h_1 \quad (2.5.2)$$

ロックウェル C スケールの場合、試験条件として基準荷重 98.07 N (10kgf)、試験荷重 1471.0 N (150kgf)、先端半径 200 μ m、頂角 120 度の円錐形のダイヤモンド圧子を使用して、押し込み深さを μ m で表現したときに、 $K=100$ 、 $k=1/2$ として計算される値が硬さ値 HRC となる。

表 2.5.1 ロックウェル硬さ試験の誤差要因

誤差要因の内容	誤差要因
定義のあいまいさ	荷重負荷パターン
試験機の不完全さ	枠の変形 荷重付加機構 押し込み深さ測長系 圧子の先端形状
硬さ基準片	基準片内の硬さの不均一性

検討の対象を、校正の目的で試験機により硬さ基準片を測定する場合で考える。このとき、表 2.5.1 に示す誤差要因が考えられる。

ロックウェル硬さでは、試験条件の定義は不十分な形でしか決められていない。歴史的には、最初の試験の定義では、荷重負荷のパターンは決められておらず、しかも、硬さ試験はいろいろな現場の中で使われており、それぞれの測定現場の要求からいろいろな条件の下で試験されていた。荷重負荷パターンについていえば、生産現場では、測定時間の効率から短いサイクル時間の条件が好まれる。一方、標準を開発し供給する標準研究所では、測定結果の安定性を考慮して、長いサイクル時間の条件が好まれる。現実には、押し込みの速度や一定荷重の負荷時間は、硬さ値に大きな影響を持っていることが分かっている。しかし、国際的にこれらの条件は統一されておらず、国により異なっており、国際規格においても幅を持って決められている。このことから、次の二つの不確かさの要因が挙げられる。

①異なった試験パターンの中のばらつき

②ある決められた試験パターンの中でのばらつき

①のばらつきは国際的に統一した標準を開発する際に研究されるべきであるが、国際標準の統一が実現したときには、また、標準条件が決められた国の中では重要な不確かさの要因ではない。一方、②のばらつきは、試験機の機構や制御系から生じるばらつきであり、荷重システムから生じる不確かさとして評価されなければならない。

試験機の不完全さから来る要因は数多くある。硬さ試験の定義によって決められた要件は、実際の試験機では完全には実現できない。荷重システム、押し込み深さの測長システム、圧子からなる試験機の要素は個別的に試験し校正される。それぞれの要素の許容値は測定機を規定する標準によって決められている。不確かさの評価においては、個々の要素のばらつきが最終結果である硬さ値にどれだけの影響を与えるかを調べる必要がある。

硬さ基準片の不均一性は、測定対象のばらつきである。それ自身は、測定という行為によるばらつきとは区別して評価されるべきであるが、硬さ試験では、この二つのばらつきを区別することには困難がある。すなわち、硬さ試験が破壊試験であることから、基準片の同じ場所を2度と測定することができないため、測定のばらつきと測定対象のばらつきを分離することができない。このような条件の下で不確かさを如何に評価するかが問題になる。

2. 5. 3 実験計画と結果

実験計画としては、誤差因子だけを取り上げた直交表実験である NFOAD 実験を活用する。表 2.5.2 に、実験に取り上げた誤差因子を示す。一般論としては、誤差因子の水準幅は、現実に条件がばらついている範囲から決める。

表 2.5.2 実験に取り上げた誤差因子とその水準

	実験因子	水準			
		1	2	3	
L18	A:基準荷重	10	10.195	10.395	kgf
	B:試験荷重	150	151	152	kgf
	C:圧子の形状	低	中	高	
	D:荷重保持時間	3	8	23	sec.
外側	G:基準片	2 ブロック			
	H:基準片内の場所	2 領域			

AとBの因子は、荷重誤差を想定したものである。本来なら目標値の前後に水準を取った方がよいが、その設定が難しいため、片側に水準を設定した。因子Cは、圧子の形状誤差の影響をみるために取り上げたものである。これは誤差を定量化するのは難しいため、経験から高めあるいは低めに硬さ値が出るような圧子を選択した。Dは、荷重保持時間のばらつきを想定したものである。

直交表 L₁₈

1 e	2 A	3 B	4 C	5 D	6 e	7 e	8 e	× G	× H
No.1 ~ No.18								基準片	場所

図 2.5.1 ロックウェル硬さ試験評価実験のわりつけ

図 2.5.1 に因子の割付と実験計画を示す。AからDまでの4つの誤差因子は直交表 L₁₈ に割り付けた。図中の数字は直交表の列番号を表している。また、eは、因子を割り付けていない誤差列であることを示している。GとHの二つの誤差因子は直交表の外側に割り付け、全てに組合わせである4通りの測定を行う。

表 2.5.3 HRC60の範囲での分散分析

要因	f	s	v
A ₁ 基準荷重：回帰	1	0.64862	0.64862
A _{res} 基準荷重：残差	1	0.03833	0.03833'
B ₁ 試験荷重：回帰	1	2.90080	2.90080
B _{res} 試験荷重：回帰	1	0.04698	0.04698'
C 圧子の形状	2	1.48778	0.74389
D ₁ 保持時間：回帰	1	0.60621	0.60621
D _{res} 保持時間：残差	1	0.00241	0.00241'
e ₁ 1次誤差	9	0.29957	0.03329'
G(H) 基準片と場所	3	0.57153	0.19051
e ₂ 2次誤差	5	1.58097	0.03100'
e プールした誤差 (\$ marked)	6	1.96826	0.03124
Total	71	8.18320	

HRC60の範囲での分散分析の結果を表 2.5.3 に示す。ここでは、量的に設定できる因子については、回帰項と残差項に分けて計算した。Cの圧子形状に関してはこのような分解はできない。また、効果 G(H)は実験に用いた硬さ基準片により変化するため、プールした誤差項には加えていない。

2. 5. 4 不確かさ成分の計算

不確かさ表現ガイドの数学モデルに従えば、入力量が基準値からはずれることにより生じる硬さ値のはずれの大きさ Δy は次のようになる。

$$\Delta y = c_A (A-A_0) + c_B (B-B_0) + c_D (D-D_0) + (Block) + (Repro.) \quad (2.5.3)$$

ここで、A, B, Cは、それぞれ基準荷重、試験荷重、保持時間の値を表わしており、Repro.項は測定の実現性を表している。また、添え字0は測定の定義で決められた基準値の値を表わしている。この表現では、硬さ値に対する誤差因子の一次の効果のみが考えられ、他の効果は誤差としてプールされることになる。

不確かさ表現ガイドの解析方法では、(Block)、(Repro.)は数学モデルに現れない。なぜなら、その成分には入力量がなく、偶然効果の一部と考えられるからである。不確かさ表現ガイドの数学モデルでは、間接測定や補助測定による補正式など、原因が特定され測定量への影響の仕方が分かっている系統効果の成分だけをモデル化している。偶然効果は数学モデルとして定式化していない。しかし、(Block)は、基準片内のばらつきであり、原因が特定できる偶然効果である。この成分があることを明示するために、あえて数学モデルの中に組み込んだ。

硬さ試験の場合の不確かさの伝播測は次のような形になる。

$$u_c^2 = c_A^2 \sigma^2(A) + c_B^2 \sigma^2(B) + c_D^2 \sigma^2(D) + \sigma_{Block}^2 + \sigma_{HR}^2 \quad (2.5.4)$$

ここで、 σ_{HR} は硬さ試験の実現性の大きさを表す標準偏差である。

この式の中の各不確かさ成分の標準不確かさを次のように評価する。

誤差因子 A,B,D による測定値の次元での標準偏差は、因子のばらつきを表す標準偏差 $\sigma(x_i)$ を用いて次のように表現される。

$$\sigma_i(y) = c_i \sigma(x_i) \quad (2.5.5)$$

ここで、二つの標準偏差を結ぶ係数 c_i を感度係数という。

それぞれの因子に対して、感度係数と標準偏差は次のように評価した。

感度係数は、この場合、回帰分析の回帰係数として計算される。NFOAD 実験の回帰分析の結果として、次の係数が求められた。

$$\begin{aligned} c_A &= 0.5886 \\ c_B &= -0.2458 \\ c_D &= -0.0108 \end{aligned} \quad (2.5.6)$$

一方、荷重誤差を表す標準偏差は、予備実験から A タイプの評価として、次のように求められた。

$$\begin{aligned} u(A) &= \sigma(A) = 0.250 \quad (\text{kgf}) \\ u(B) &= \sigma(A) = 0.119 \quad (\text{kgf}) \end{aligned} \quad (2.5.7)$$

荷重負荷パターンにおける試験荷重負荷時間の標準偏差は、技術的知識と負荷装置の仕様に基づいて求めた。負荷時間の誤差の最大限界値を 2 秒として、一様分布を仮定することによって、

$$u(D) = \sigma(D) = 2 / \sqrt{3} = 1.15470 \quad \text{sec} \quad (2.5.8)$$

とした。これは B タイプの評価である。

従って、基準荷重、試験荷重及び荷重負荷時間のばらつきに起因する硬さ値の不確かさ成分は、硬さ値の単位で、次のようになる。

$$\begin{aligned} u_A(y) &= \sigma_A(y) = |C_A| \sigma(A) = 0.14715 \quad (\text{HRC}), \\ u_B(y) &= \sigma_B(y) = |C_B| \sigma(B) = 0.02925 \quad (\text{HRC}), \\ u_D(y) &= \sigma_D(y) = |C_D| \sigma(D) = 0.01247 \quad (\text{HRC}). \end{aligned} \quad (2.5.9)$$

一方、表 2.5.3 のプールした誤差分散から、再現性を表わす測定値のばらつきを次のように求める。

$$\begin{aligned} \sigma_{HR}^2 &= 0.03124 \\ \sigma_{HR} &= 0.1767 \quad (\text{HRC}) \end{aligned} \quad (2.5.10)$$

プールした誤差分散には、誤差因子 A,B,D の残差項と因子間の交互作用が含まれる。残差項は、各因子の系統効果の線形モデルを考えた場合の誤差成分である。この誤差分散は単なる繰返し性ではなく、再現性を表している。繰返し性は、同じ測定条件のもとで短時間の間に行った測定のばらつきを意味しており、一般に再現性より小さい値を取る。NFOA D実験においては、直交表に示された測定条件設定のもとで測定が行なわれ、単なる繰返しではなく、条件設定のための操作が入り、時間がかかるため、反復条件でデータが取られる。そのため、プールした誤差分散から計算した標準偏差によって硬さ測定の再現性を表わす、偶然効果に相当する不確かさ成分 u_{HR} を A タイプの評価として求めることができる。

$$u_{HR} = \sigma_{HR} = 0.1767 \quad (2.5.11)$$

また、硬さ試験片内での硬さのばらつきは、測定の再現性と同じであると考えた。これは、硬さ測定は試験片に圧痕をつくるため、同じ場所を二度は測定できないため、厳密な意味での再現性を評価できない。上で、試験片内の硬さのばらつきがないと仮定して、再現性を評価したが、一方、完全に硬さ測定に再現性がある、すなわち、再現性の標準偏差がゼロであると仮定すれば、 σ_{HR} は異なった位置で測定した試験片内の硬さ値のばらつきに相当する。再現性と試験片内のばらつきとは交絡して、分離できないため、安全側の不確かさ、すなわち、大きめの不確かさの値の評価として、

$$u_{\text{Block}} = \sigma_{\text{Block}} = \sigma_{\text{HR}} = 0.1767$$

(2.5.12)

を仮定する。

圧子の形状による誤差成分については、表 2.5.3 から分かるように、大きな効果を持っている。しかし、例えば、頂角の誤差、頂点の曲率半径の誤差、表面粗さ、などがどの程度硬さ値の誤差に影響するかの定量的な関係を求めることは困難である。圧子の形状測定自体は小さな不確かさで実施でき、また、硬さ値は形状に強く依存する。標準研究所レベルでは、その影響度が大きいと、コストが許す限り形状誤差の小さい圧子を選択して使用することが追求される。しかし、現場の測定においては、そのような選択をすることは、コスト高につながり、現実的ではない。

一方、圧子を含めた硬さ測定システムが国家標準によって校正されれば、圧子の形状誤差によるかたよりの大部分は修正することが可能である。このため、この成分については、ここでは含めないこととした。圧子の形状と他の因子の高次の交互作用についてはプールの誤差分散の中に含まれている。NFOAD 実験において、主効果として含めない条件があっても、高次の交互作用はばらつきの中に含まれて評価されるため、このような因子を取り込んだ実験計画を積極的に取りあげることが必要である。

2. 5. 5 合成標準不確かさ

一般に、校正によって硬さ試験片に標準値が与えられるとき、硬さ測定は複数回行なわれ、その平均値が標準値として使われる。日本の標準設定においては、試験片表面を、円周方向3区分、半径方向3区分、合わせて9区画に分割して、各区画内で測定を行う。国家標準レベルでは、9区画全部の測定を行うが、校正機関のレベルでは、3区画を測定し、その平均値が試験片の値として使用される。

n回の繰返し測定を行う校正機関が硬さ試験片に与える標準値の不確かさの値は次のようになる。

$$u_c^2 = c_A^2 \sigma^2(A) + c_B^2 \sigma^2(B) + c_D^2 \sigma^2(D) + \frac{\sigma_{\text{Block}}^2}{n} + \sigma_{\text{HR}}^2 \quad (2.5.13)$$

このような形になるのは、試験片内の繰返し測定によっては、試験片内の硬さのばらつきによる不確かさ成分以外の不確かさ成分は平均化されない、という事実による。すなわち繰返し測定では同じ条件のもとで測定が行なわれており、同じようにかたよりをもった測定値しか得られず、再現性のばらつきは平均化されない。一般に、複数回の測定によって、どのような不確かさ成分が平均化されるかは、もとのデータの取得状況に依存する。

前項求めたすべての不確かさ成分を用いて、ロックウェル C スケールの硬さ測定に基づく、試験片の標準値の合成標準不確かさを求めると次のようになる。

$$u_c = 0.25 \text{ (HRC)} \quad (2.5.14)$$

但し、この不確かさの値には、圧子の形状誤差の効果は含まれていない。試験片内のばら

つきは平均的なものであることを前提としている。試験片の組成が悪く、片内のばらつきが大きい場合には、この不確かさの値は適用されない。むしろ、複数回測定した値の差が大きい場合には、そのような試験片を基準として使うことには問題があると考えられるため、標準値を与えるべきでない。

また、この不確かさの値は、あくまでも試験片に与えられた標準値の不確かさであって、試験片の硬さ値の不確かさではない。すなわち前者は測定プロセスの結果の性質を表わすものであり、後者は試験片という物質のばらつきという性質を表わすものである。後者として表現を完全にするためには、物質としての劣化によるばらつき成分を考慮に入れていく必要がある。

2. 5. 6 不確かさ適用のまとめ

ロックウェル C スケールにおける硬さ測定において、硬さ試験片に標準値を与えるという校正の不確かさを評価した。不確かさ評価のために、誤差因子をわりつけた実験計画(NFOAD)を用いた実験を行い、不確かさ評価に必要な感度係数を求め、不確かさ伝播則の係数として用い、合成標準不確かさを評価した。NFOAD 実験は、Aタイプと呼ばれている統計的方法による不確かさの評価方法として有効に活用することが出来る。特に、他の因子の水準の平均的な効果として評価できる点で、有効である。

ここで示した実験は、不確かさ表現ガイドが出版される前に実施されたもので、JISZ9090 校正方式通則の中で実物測定の誤差の大きさを実験により求める方法として示された実験計画に沿って行われたものである。そこでは、ここで示された方法とは異なった形の解析をしていたが、同じデータで不確かさ表現ガイドに従った解析が出来ることを明らかにした。

不確かさ表現ガイドに関しては、次に点を明らかにした。

- 1) 偶然効果に関する情報は、数学モデルには含まれない。
- 2) 平均値の不確かさを求める場合、平均化される成分はデータの構造による。

2. 6 不確かさ表現ガイドの問題点－SN比の方法との関連

2. 6. 1 不確かさ表現ガイドの問題点

不確かさ表現ガイドは、不確かさという概念のもとで測定の信頼性を評価したとき、如何に統一的な説明をするかを記述したものである。その意味で「表現のガイド」である。

不確かさガイドで計測の信頼性を表現する方法は、従来、不可知の量である真の値を基準にした「誤差」を用いる方法と大きく異なっている。誤差、すなわち、「測定値から真の値を引いた差」を基にしている限り、その大きさを求める方法についての国際的な合意は難しかったという歴史的な状況を反映している。不確かさ表現ガイドは、その論争に終止符を打ち、一定のルールで信頼性を表現する方法を提案することによって、国際的な比較を容易に行うことができる基礎をつくったと主張している。そこでは、一定のルールに従った評価に基づき、実際に得られる測定値のばらつきを不確かさで表現することによって、測定の結果の信頼性を相互に理解し合えることが基礎となっている。不確かさ表現ガイドでは、評価・表記の方法が「普遍的であること」、そこで使われるデータや結果に「内部一貫性があること」、「伝達可能であること」を要求している。この指針に従った評価の結果がそのような条件を満たすことを期待されている。すなわち、ここで示された指針に従って表記された結果は、一貫性のある測定の結果として、その結果の利用者によって受け入れられる。逆に言えば、不確かさ表現ガイドのルールに沿った説明が要求されていると解釈すべきである²¹⁾。

評価方法という観点では、不確かさ表現ガイドは幾つかの具体的方法を記述しているが、その内容は必ずしも十分であるとはいえない。問題点の1つに、Aタイプの不確かさの成分を評価するための統計的方法にどのような方法があるかの問題がある。不確かさ表現ガイドは、計算方法として、「一連の独立な測定の結果」としての観測値のばらつきを試料標準偏差として評価すべきことを述べている。このような評価を行うことは、実際には困難である。ここで、「独立な」という点が重要で、どのような空間で独立性が確保できるか。例えば、単なる短い時間内の繰り返しの観測値では繰り返しのばらつきは評価できても、測定の実体を反映した信頼性の高い不確かさ成分を評価することはできない。

実験空間で観測値の独立性を確保するためには、データ収集の方法を明確にすべきである。その点では、実験計画法をベースに、性能通則は繰り返し、反復のデータから、繰り返し性、再現性を評価する具体的な方法を提案している。また、JISZ9090 校正方式通則は、SN比の方法をベースにして、測定条件を因子として取り上げた実験計画を提案している。前節のNFOAD 実験の配置はその一つである。これらの方法をAタイプの評価方法として活用することが有効な不確かさ評価のためには必要である。

一方、Bタイプの評価方法を導入したことは、評価の客観性の確保という意味で問題を残す。Bタイプの評価においては、統計的方法以外のあらゆる方法を許容していることになり、個々で技術的見解が異なれば、それを解決する方法は事実上ない。そのため、あるグループの中ではグループの合意として不確かさの要因と見積もり方法を決めてしまう場合もある。本来、計測の結果とその不確かさの評価に説得力を持たせるためには、実際のデータに基づいた評価方法をその中心にすべきであり、また、それだけでは不十分な場合の方法としてBタイプの評価の道が残されている、と考えるべきである。

また、真の値を追求することから離れることにより、現実の測定における誤差評価に混

乱を招いている。不確かさ表現ガイドに従えば、測定値は真の値の最良推定値であるべきであるが、校正でかたよりが検出されたときにそれを系統効果として補正しない場合、不確かさとしてどのように評価し合成するかの共通認識はない。平均2乗誤差としての分散を求めるという立場からは、かたよりとばらつきを2乗和として合成するのが自然である。しかし、その点の合意はなく、どう処理するかは解析者の考えによることになる。

さらに、器差を補正するかしないかという校正結果に対する対策は、実際には科学的なものではなく、対策のコストとそれによって得られるであろう利益とのバランスの問題である。このような経済性の観点は不確かさ表現のガイドには欠けている。計測や製品の誤差の経済性検討のための評価指標として、田口の損失関数は校正方式通則に利用されているが、不確かさ評価においても同じように利用すべきである。

2. 6. 2 SN比の方法の立場

不確かさ表現ガイドの観点から、SN比の方法を検討する。不確かさの評価において、SN比の方法はAタイプの評価の方法として位置づけることができる。

不確かさ表現ガイドでは、系統効果と偶然効果からなる誤差に対して、再現性のある系統効果に基づくかたより部分は補正し、真の値の最良推定値を求めることにより測定値の信頼性をあげ、残ったばらつきの部分である偶然効果を不確かさとして評価するという方法を採用している。ここで、再現性のない系統効果は偶然効果として評価される。

一方、SN比の方法の中で、校正式を使って測定値を得ることはかたより部分の補正に相当している。校正式を用いた測定値は補正後の値であり、真の値の最良推定値である。

SN比の導入の中で述べたように、SN比は測定値の校正式からの差をばらつきとして評価した。ばらつきという意味は、測定点によって「差」は変化しており、固定した点ではかたよりと見えるが、全体としてはばらつきとして現れる、という意味である。この「差」を誤差と考えたときの2乗平均誤差としてSN比が求められている。すなわち、SN比は校正後の測定値の分散に対応しており、「分散の正の平方根」と定義された標準偏差にすることは容易である。

実験計画の観点から見ると、SN比を求める実験計画の中で誤差因子を実験因子として割り付けることによって、要因効果としてばらつきの大きさ、すなわち、不確かさ成分を求めることが可能である。多元配置や直交表など直交型の実験計画を用いれば、それらの要因の合成された合成標準不確かさに相当する結果を全変動から直接的に求めることも可能である。このような方法は、JISZ9090「測定-校正方式通則」の附属書2において、実験的に誤差の大きさを求める方法として引用されている。

さらに、SN比の方法は、測定量の真の値が正確にわからない場合であっても、測定量の加法性を利用して誤差の大きさの推定を可能にしている。すなわち、信号因子の作り方を工夫することによって、加法性あるいは比例性からのはずれの大きさをSN比として評価することである。ここで、工夫とは信号の水準を意識的に設定することである。例えば、標準分銅の代わりに質量一定の複数のものを利用して信号因子を作り、質量の加法性からのはずれの大きさを誤差の大きさとして評価することができる。また、未知の濃度サンプルに濃度既知のサンプルを混合させることによって多水準の信号因子を作るなどの方法を積極的に利用することが可能である。そのことによって、標準という純粋条件ではなく、

より実物に近い現場の条件の中での誤差評価を可能にしている。

SN比による評価方法は、「測定量が増加したときにそれに対する測定系の出力（読み）が加法的に変化する。」という測定の動的機能に忠実な評価方法である。従来、測定系に対する多くの評価が、値の分かった測定量のある1点でかたよりとばらつきを評価するという形で進められてきた。1点に固定することによって、現象を正確に捉えることができず、そのために混乱を招いたということもできる。不確かさ表現ガイドは、測定量の真の値の追求をやめてばらつきだけの評価に方向転換しており、真の値が正確に分からなくても誤差の大きさに相当するものを評価する方法は提示できていない。

それに対して、SN比による評価方法の特徴は、測定量（入力）と読み（出力）の関数関係（加法的）に基礎をおいた評価である。関数関係を用いることにより、測定量を表す信号因子として値の分かった計測標準に頼らず、値の分からない実物を用いたとしても水準間の関係を基礎に適切な評価ができるということにある。SN比の方法は、信号因子の水準値を絶対値として正確に設定できない実物の測定における誤差の大きさの評価において、加法的あるいは比例性をうまく利用することによって、測定の評価を可能にしている。

鳴下等^{2-12, 2-13}は、JISZ9090に示された校正方式通則の校正と評価の手順を適用し、実物標準を用いた校正方式について検討を行っている。その中で、実物標準による誤差評価にSN比の方法を適用している。測定誤差の主要な部分は、計測標準を用いた校正作業による部分ではなく、実物の測定に起因する部分である。例えば、マイクロメータによるプラスチック製品の測定において、大きな誤差成分はプラスチック製品を測定する部分であり、プラスチック製品にとってのスケールと校正に用いたブロックゲージでのスケールが異なったものになる可能性が存在する。ブロックゲージを用いた校正は、対象としたマイクロメータのスケールが、普遍的なスケールにトレーサブルなブロックゲージのスケールと一致していることを確認する意味を持っており、測定器としてのマイクロメータを保証するものであるが、プラスチック製品にとってのスケールを保証するものではない。その意味で、実物の測定対象と形態が同じである実物標準を開発することの意味は大きい。そのとき、単に1点だけで評価するのではなく、SN比の方法によるスケールとしての評価が有効である。

2. 7 2章のまとめ

第2章では、計測の作業的な部分である測定システムのパフォーマンス評価の基礎となる誤差評価の方法を、測定の機能性評価の立場から明らかにした。

すなわち、測定の機能は測定対象量の真の値を測定値として推定することである。測定に期待される機能を満たす程度を表す機能性は、測定誤差により定量化される。そのために必要な測定システムの機能は、測定の尺度をベースとした測定量の加法性を、測定システムの出力である測定値の加法性として実現することである。測定誤差の大きさの定量化のために、誤差及びその評価の方法の基本を、加法性の実証と加法性からのばらつきの評価を行うSN比の方法に置いた。

SN比の方法による測定の機能性評価とその中で用いられている「校正」の概念を基に、校正を前提にした測定システムの誤差の成分を検討した。さらに、SN比の方法と従来の誤差評価手法との共通点、相違点を明らかにするとともに、今後、世界標準として広く使われると思われるISOの不確かさ表現ガイドの方法との関連を検討した。

それらの中で、次のことを明らかにした。

- 1) 測定システムの性能は、誤差そのものではなく、母集団として規定された条件の下で求められた測定値の集団の性質として、分散あるいは標準偏差で表現された「誤差の大きさ」を用いることができる。
- 2) 測定システムの機能性を評価するという立場から、動的特性のSN比によって測定システムの基本性能を的確に評価できる。
- 3) 校正を前提にした測定の誤差には、実物測定の誤差、校正作業による誤差及び校正に使用した標準の誤差の成分が含まれる。
- 4) 誤差の大きさは、測定器に固有のものではなく、管理条件、環境条件を含めた測定システムの条件により決まる。
- 5) 従来の誤差評価の方法は、測定量一定の点でのかたよりとばらつきを基礎とした静的な評価が中心であるが、動特性のSN比の方法では、測定範囲内での加法性からのばらつきとして、現実的な誤差の大きさの評価が可能である。
- 6) ロックウェル硬さ試験の不確かさ評価に、JISZ9090 校正方式通則で使われている品質工学の許容差設計の実験計画を活用した。このデータは不確かさ表現ガイドの出版以前に取られたものであるが、不確かさ評価の考え方に沿った解析が可能であることを明らかにした。
- 7) SN比の方法は、測定の不確かさの評価のなかで、不確かさを推定する統計的方法の有力な方法として位置づけることができる。
- 8) 動的特性のSN比評価のための信号因子の考え方を活用して、標準値が明らかな校正の場合はもちろん、真の値が分からない実物が対象の場合であっても、加法性をベースにして測定の誤差の大きさの推定が可能である。

以上のことから、測定システムのパフォーマンスを定量化するための誤差評価においては、次の点を明確にすべきである。

- 1) 評価対象である測定システムのハード、ソフトの条件を明確にする。
- 2) 計画的なデータの取得のために、実験計画法を用いる。特に、補正しない系統効果を確率化することを考慮した配置が望ましい。

- 3) 実験計画としては、信号因子と誤差因子を活用したSN比による評価を行う。
- 4) 標準と実物の形態が異なる場合、誤差の表れ方が異なるため、特別な配慮が必要である。