

鏡筒光学製品の統計的公差設計

佐々木 豊春

一般に、公差は「組立可能性」を保証するための設計値に対する「許容幅」として理解されている。しかし、カメラ・レンズに代表される「光学製品」では、公差は「組立可能性」の保証のみならず、各光学機能面の空間配置状態を、その状態によって決定される仮想光軸に対して、マイクロメートル単位で維持できることをも保証しなければならない。これが光学製品での公差設計を困難にしている理由のひとつであり、一般機械製品における公差と「考え方」の大きく異なる点である。

加えて量産光学製品では、設計段階において量産時の「製品性能・量産性・公差感度」を、正確かつ定量的に判断するのがきわめて難しいという問題点がある。このため、実際の製品開発では量産初期段階において予想外のトラブルが多発し、開発期間の長期化やコスト増を招いていた。これらは設計段階において量産時の光学性能や量産性の評価、またそれらを考慮した公差設計が十分かつ適切に行われていないためである。

上記問題点の解決と量産光学製品の生産性向上の方法として、筆者らは「仮想量産試作システム (virtual PT system)」¹⁻⁴⁾を提案し開発してきた。本システムでは設計段階において量産時の製品性能や量産性を定量予測できるため、その結果を光学・鏡筒設計に反映させることで、より適切な公差設計が実施可能となる。また、機械設計者でも自分の設定公差によって量産時の光学性能がどう変化するかを容易に理解できるため、設計や公差の評価が適切に行えるようになる。

本報では、この量産製品に対する公差設計の考え方と本システムを用いた公差設計法について解説する。

(株)ニコン技術システム部 (〒140-8601 東京都品川区西大井 1-6-3)
E-mail: sasaki@nikongw.nikon.co.jp

1. 公差に関する従来の研究

公差に関する研究報告はけっして少なくない。しかしながら、一般量産光学製品に関する研究や報告はきわめて少ないので現状である。

はじめに、光学分野では松居^{5,6)}による公差決定法（松居法）がよく知られている。また、今井・池田⁷⁾は偏芯公差の決定に対して、第1段階に松居法を用い、第2段階ではモンテカルロ法によって公差の妥当性を検証する手順を提案・報告している。Rimmer^{8,9)}, Koch¹⁰⁾, Hilbert¹¹⁾らは、各偏差に対する光学性能 (modulation transfer function: MTF や波面収差) 変動を二次式で近似可能であるとの研究結果から、量産時の光学性能や公差感度を統計的かつ理論的に求める方法を提案・実現している（この理論はCODE-Vにおける公差解析機能として実現されている）。

システム関連では、Forse¹²⁾が、モンテカルロ法による統計的な光学性能評価ソフトウェアの報告をしている。また、Drake¹³⁾は光学製品の公差設計に対し、「6 σ (シックス・シグマ)」の考え方に基づく Q & A 方式の公差決定システムを報告している。国内では小島ら¹⁴⁾が、ばらつきを考慮しながら鏡筒ユニット設計を効率的に行う知識ベース・システムを報告している。

最近 ISO などの機械系分野では、上限/下限による公差指定以外に、その公差幅内での誤差分布をも明示的に指示し、設計段階から量産時のばらつきを積極的に管理・制御していく「統計公差」の考え方が規格化されつつある^{15,16)}。統計公差では、従来曖昧であった公差幅内の誤差分布をも明示的に図面に表記し、製品性能のばらつきをも含めて設計者サイドで決定するものである。

このように、近年は設計自体が「機能設計」中心から、量産製造を前提とした「生産設計」重視に向かい、統計公

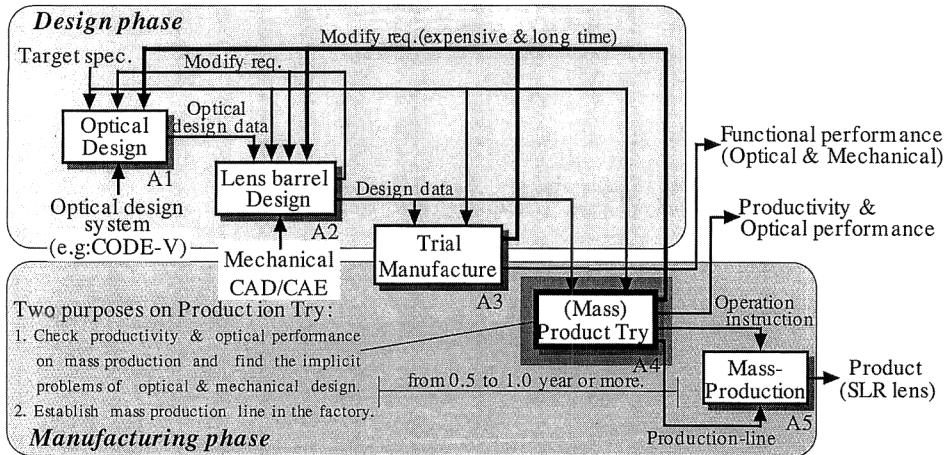


図1 鏡筒光学製品における従来の製品開発工程 (IDEF0).

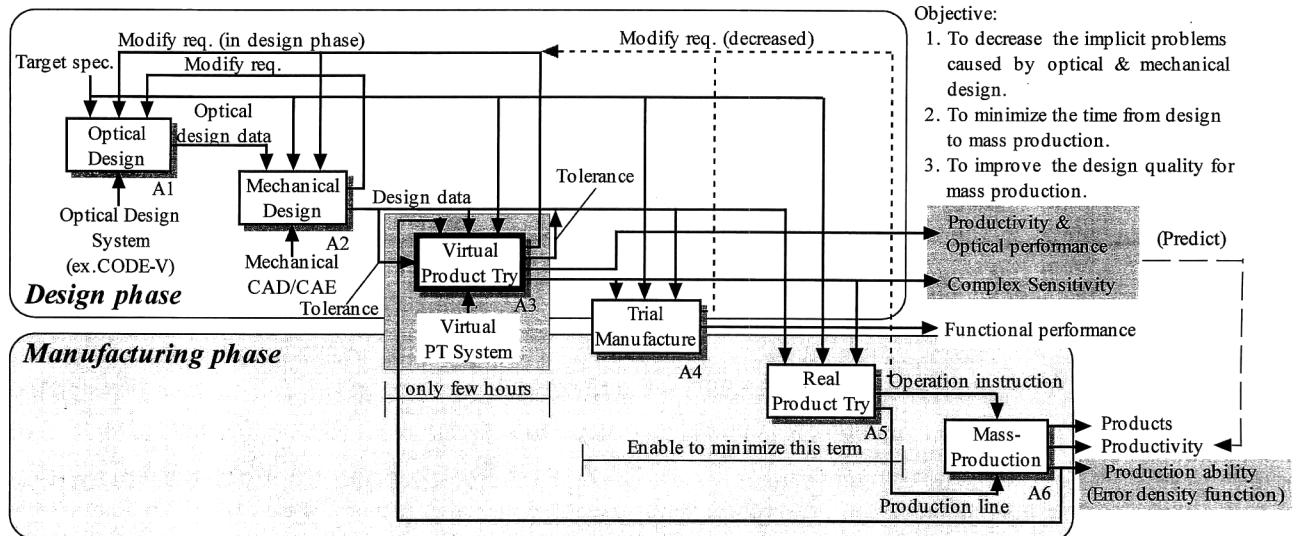


図2 筆者らが提案する新しい製品開発工程 (IDEF0) と仮想量産試作システム (virtual PT system).

差の考え方も徐々に普及してきている。

2. 公差設計からみた製品開発工程

はじめに、従来の製品開発工程 (IDEF0) を図1に示す。IDEF0 (ICAM definition language) はISOなどで利用されているシステムやプロセスの図式手法である¹⁷⁾。

通常の製品開発では、製品計画に基づいて「目標仕様」が与えられ、それに従って「光学設計 (A1)」、「鏡筒設計 (A2)」が実施される。そして、設計作業が完了した後に「機能試作 (A3)」や「量産試作 (A4)」の試作工程が実施され、最後に「量産工程 (A5)」へと移行する。

従来、最終製品状態での光学性能の確認や検証は「機能試作 (A3)」や「量産試作 (A4)」においてのみ行われていた。これは、設計段階で製品状態の性能検証をしたくても、実際に試作を行って性能を測定しない限り、製品性能を把握・評価する方法がなかったためである。したがつ

て、設計者は単に要求仕様に対する機能設計を行うだけとなり、量産製品としての「設計の正当性」や「製品性能の検証」、量産に対する「公差の検証」などは、機能試作や量産試作工程に移行するまで判断できなかった。すなわち、最終製品状態での設計検証の方法・手段・工程が確立されていなかったのである。

3. 仮想量産試作システムと統計的公差設計

3.1 仮想量産試作システム

筆者らが提案してきた「仮想量産試作システム」は、部品製造・組み立て・調整・性能検査に相当する各工程を計算機シミュレーションによって仮想的に行い、実際に製品を作ることなしに量産時の製品性能や量産性を定量評価可能とするものである^{1,2)}。このシステムを製品開発工程に適用した際の IDEF0 を図2に示す。また、本システムの IDEF0 を図3に示す。

システムは大きく分けて以下の3つの機能ブロック

① 光学性能の量産シミュレーション・システム (A31)

② 公差と光学性能の複合感度解析システム (A32)

③ 公差と製造コストの自動最適化システム (A33)

から構成される。

①は光学製品の量産工程をモンテカルロ法でシミュレートする。この機能では光学系の公差だけではなく、鏡筒構造や鏡筒部品の公差をも直接扱えることがきわめて重要である。②は量産シミュレーションの結果から、光学性能に対する公差感度を求めるシステムである。この解析では、公差が複合した状態での感度、すなわち複合公差感度が正確に求められなければならない。③は量産シミュレーションならびに複合感度解析の結果および製造コストから、最適な公差を決定するシステムである。

これら3つのシステムを光学・鏡筒設計の中で用いることにより、量産性と量産性能および製造コストを同時に満足する、適切な公差設計が実現可能となる¹⁻⁴⁾。

3.2 統計的公差設計

従来光学製品の設計は、基本的に最悪法の考え方に基づき、製造時の性能劣化マージンを見込んで設計する方法であった。この方法の欠点は、必然的に厳しい公差設計にならざるをえないだけでなく、余裕分の適切性を正確に判断することがきわめて困難な点である。

量産時の製品性能や製造・組立誤差が、常にあるばらつきをもつ以上、製品設計もばらつきがあることを前提として行わなければならない。そのためには、製品性能のばらつきを設計段階で正確に評価・判断する手法が必要となる。そして、この手法を用いて部品の製造・組立誤差なら

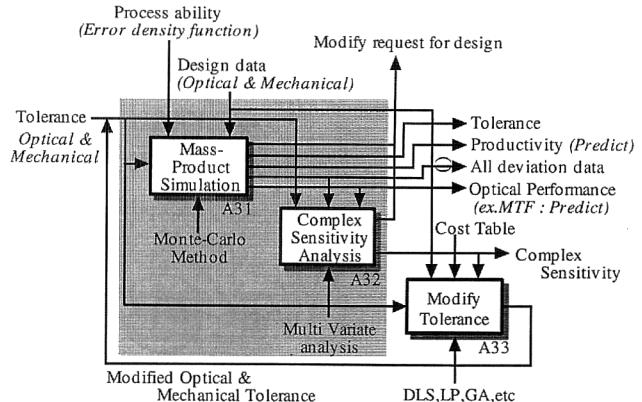


図3 仮想量産試作システム (IDEF0)。

びに性能ばらつきを考慮しながら製品設計を行うことで、「統計的公差設計」が実現されるのである。

3.3 光学製品の量産シミュレーション

本システムでの「量産シミュレーション」の特徴は、鏡筒構造ならびに鏡筒部品公差や組立公差をも直接考慮できる点である。つまり、鏡筒の組み立てをリアルタイムでシミュレートする機能をもっているのである。さらに、いくつかの調整作業機能(表1)もあるため、実際の量産製造工程に近い状態を計算機内で再現可能である。

この鏡筒組み立てシミュレーションの計算過程を図4に示す。本システムでも光学計算は通常の光学設計システムを用いている。したがって、図4の手順に従い仮想的に製品を製造し、各面の偏芯量を求めて光学設計システムへと入力する。これにより、従来は困難であったような複雑な偏芯状態でも容易に再現できるようになっている。

モンテカルロ法では、膨大な数の結果データが得られる。しかし、その結果を逐一追跡することは非現実的である。

表1 取り扱い可能な公差（調整作業を含む）の一覧。

Classification	Name	Type	○/×	Example of unit
Optical	Curvature		○	Number of Newton ring
	Distance	Thickness	○	According to GD & T
		Distance	○	According to GD & T
	Index		○	Upper & lower limit
Decentering	Dispersion		○	Upper & lower limit
	Surface	Tilt	○	second
	Glass	Tilt	○	second-minutes
		Shift	○	μm
	Block	Tilt	○	second-minutes
Lens form deviation		Shift	○	μm
	Toric		○	Number of Newton ring
	Deform	Rotational	○	Type & Newton ring
Adjustment		Random	×	
	Center fit	Shift	○	Adjustment limit (μm)
	Decenter	Tilt	○	
		Shift	×	

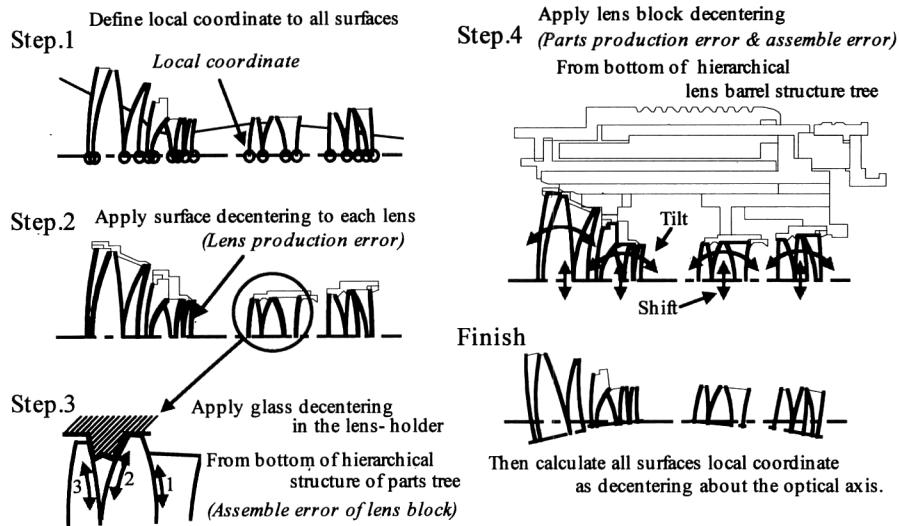


図4 鏡筒組み立てシミュレーションの手順。

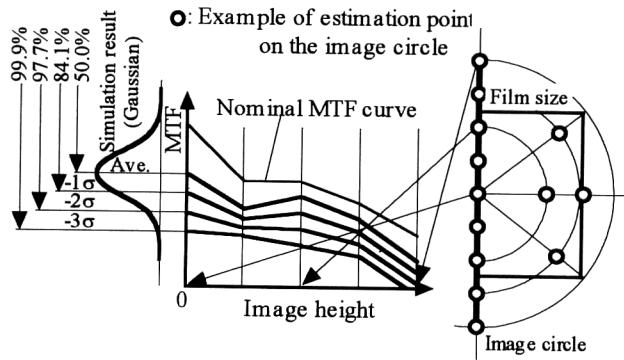


図5 量産シミュレーション結果の表示方法。

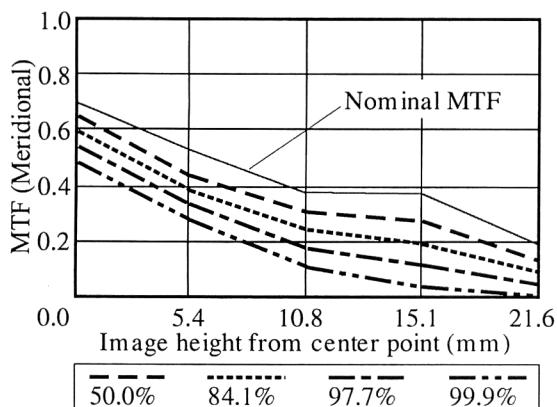


図6 量産シミュレーション結果の一例。

る。そこで、この結果を容易に表記する方法が必要となる。図5はその表記方法を示したものである。統計学の観点からみると、各誤差が分布関数に基づく確率現象であるならば、製品性能の分布は中心極限定理により正規分布になると見なすことが可能である。そこで図5のように横軸に像高、縦軸に光学性能を取り、設計値、平均値、 -1σ

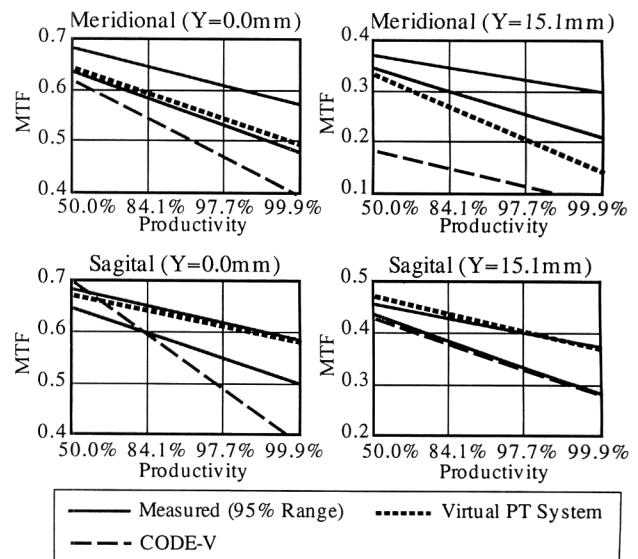


図7 量産シミュレーション結果の実測値との比較。

$, -2\sigma, -3\sigma$ の各ラインをプロットする。個々のラインは正規分布の形から、平均値が良品率50.0%を意味し、 -3σ は良品率99.9%を意味する。各像高において製品性能の下限値を設定すれば、その値における良品率が一目瞭然となる。逆に、良品率を基準にすれば、各像高での量産時の性能が容易にわかる。この表記は量産性能と量産性を同時に表示できるため、鏡筒設計者や製造技術者でも容易に理解できるものである。なお、図6には実例グラフを示す。この結果をもとに公差を修正し、再度量産シミュレーションを繰り返すことで、量産性能と量産性を両立した公差設計が実現可能となる。

では、この予測結果はどの程度信頼できるのであろうか。筆者らは数年をかけて製造ラインの工程調査を行い、

その調査結果から量産シミュレーションの信頼性を検証した。その一例として、図7に予測量産性と実測量産性との比較を示す。実測値は95%信頼区間を示す幅（実線）で示し、本システムでの予測値を破線で示す。図7より本システムでの予測値は十分信頼できることがわかる。

3.4 複合感度解析システムと統計的公差感度

図8は筆者らが実現した複合感度解析システムのIDEF0を示す。量産シミュレーションはモンテカルロ法を採用しているため、誤差データとそれに対する光学性能

Regression equation :

$$MTF = \sum_{i=1}^n a_i p_i + \sum_{i=1}^n b_i p_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n c_{ij} p_i p_j$$

Linear term Quadratic term Complex term

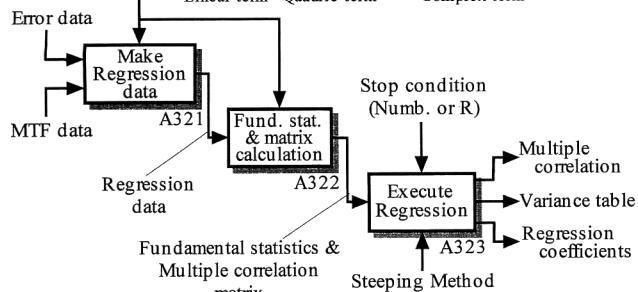


図8 複合感度解析システムの構成図 (IDEF0)。

のデータがサンプル数分ある。これをうまく再利用して公差感度の解析を行う。実現方法は図8に示されるように「重回帰分析」による相関分析法を採用している。したがって、得られる公差感度は製品全体の性能変動に対する「統計的な公差感度」となることが特徴である。

重回帰分析法では解析に際して誤差データ（説明変数）と光学性能（目的変数）とを関係付ける定義式（回帰モデル）が必要である。筆者らは、この定義式として図8に示される数式を用いている。この回帰モデルの特徴は、各偏差の変動に対する製品性能変化を二次式で近似する点である。したがって、非線形性の強い光学性能に対しても広い範囲で適用可能である。また、相互作用項が考慮されているので複合感度も得ることができる。

重回帰分析にもいろいろな解法があるが、筆者らは動的探索手法である「変数選択型重回帰分析法（変数増減法）」^{18,19)}を採用している。これは、製品設計においては公差感度の高い項目のみがわかれればよく、感度の低いものは知る必要がないためである。

図9に複合感度解析の実施例を示す。この例は図の光学系（2群7枚）に対し、ある公差案を適用した際の解析結果（MTF）の一部である。54個の公差（曲率半径、屈折

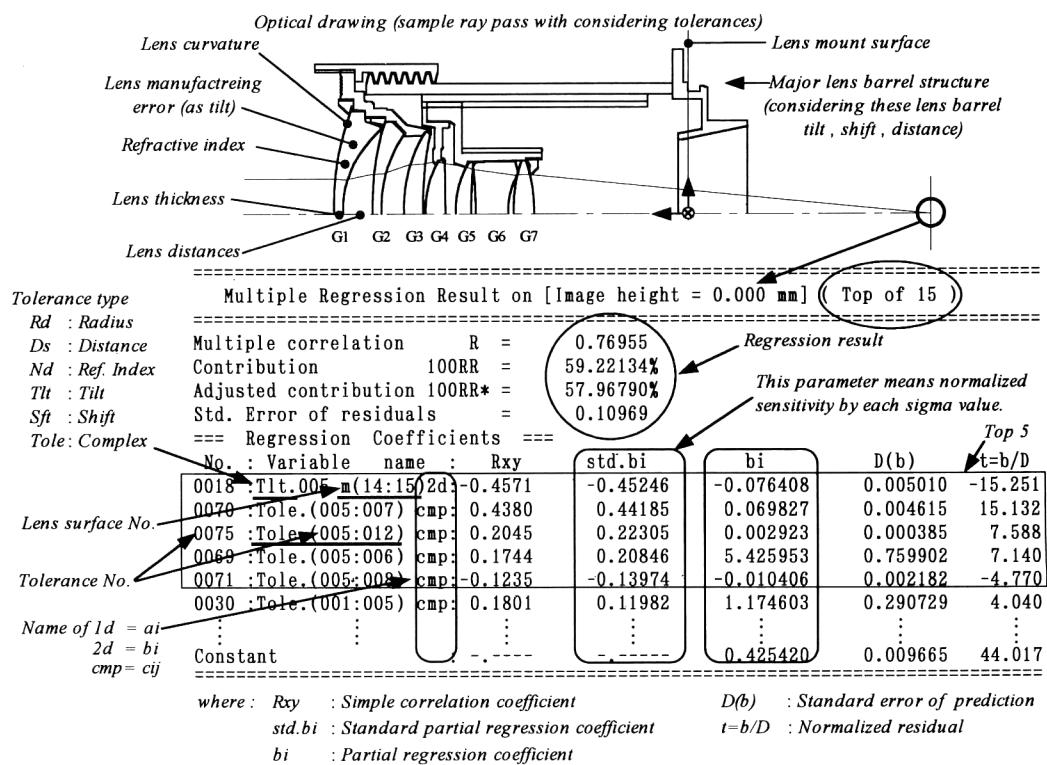


図9 複合感度解析結果の一例（重回帰分析結果）。

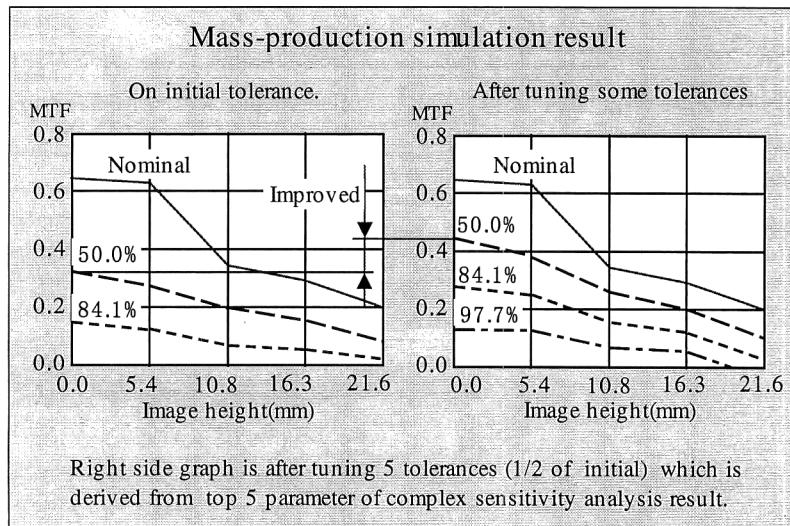


図 10 複合感度解析結果をもとにした公差修正前後の量産性比較（量産シミュレーション結果）。

率、分散、レンズ厚、空気間隔、透過偏芯、鏡筒偏芯）に対し、求めるべき回帰係数は 1539 個にもなる。図は全係数の中から感度の高い順に上位 15 個を探索計算した際の結果である（さらに上位 5 個だけを抜粋）。

3.5 感度解析から得られる結果

解析結果に光学系の構成や鏡筒構造を当てはめると、製品設計に対して非常に有用な情報が得られる。

重相関係数 (R) は探索係数（上位 15 個）による回帰推定値と目的変数 (MTF) との相関であり、探索係数によってどの程度目的変数のばらつきが説明できるかを意味する。逆に標準回帰残差 (standard error of residuals) をみることで、探索係数以外の係数が性能変動に与える程度も判断できる。標準偏回帰係数 (std.bi) は、入力説明変数と目的変数の標準偏差をすべて $\sigma=1$ に正規化した際の偏回帰係数である。つまり、すべての公差幅が同一条件となるように正規化した際の相関値である。したがって、感度の大小比較や順位付け、設定公差幅の適切性などは、この標準偏回帰係数で比較判断可能となる。

図 8 の重回帰モデルは、1 次成分、2 次成分、複合作用成分の 3 つの成分で構成されており、この回帰式の係数や符号から次の解釈が得られる。まず、1 次の成分は各公差の偏差量に比例して性能ばらつきが大きくなることを意味する。したがって、標準偏回帰係数の符号と偏差量の符号が同じであれば、性能低下には寄与しないことがわかる。すなわち、部品公差や機械構造を考慮する上で、標準偏回帰係数の符号と同じ方向に偏差が起こるように設計すれば性能低下が起りにくくなる。次に、2 次の成分では偏差の 2 乗は常に正值であるため、2 次の係数が負の場合には

偏差の 2 乗に比例した性能低下を起こすことがわかる。同様にして、複合作用成分からは、2 つの公差の相互作用による影響を直接知ることができる。

図 10 に複合感度解析の信頼性検証実験結果を示す。左のグラフは公差修正前の良品率であり、右側は感度解析結果から公差を修正した後の良品率である。公差の修正は図 9 に示された上位 5 個の係数に対応する公差（像高 0.0 mm での解析結果）の幅を半分とする方法で行った。結果は予想どおりに撮影領域中心部で最も量産性能が改善されていることがよくわかる。

文 献

- 1) 佐々木豊春、新海雅彦、東山孝一郎、田中文基、岸浪建史：“鏡筒光学製品における公差設計システムの開発—仮想量産試作システムと量産シミュレーションー”，精密工学会誌，**64** (1998) 1090-1095.
- 2) 佐々木豊春、新海雅彦、東山孝一郎、田中文基、岸浪建史：“鏡筒光学製品における公差設計システムの開発”，第 23 回光学シンポジウム講演論文集 (1998) pp. 13-16.
- 3) T. Sasaki, M. Shinkai, K. Higashiyama, F. Tanaka and K. Kishinami: “Development of statistical tolerancing for optical product,” SPIE, **4382** (1998) 528-537.
- 4) 佐々木豊春、新海雅彦、東山孝一郎、田中文基、岸浪建史：“鏡筒光学製品における公差設計システムの開発(第 2 報)複合感度解析システムの実現”，精密工学会誌，**65** (1999) 279-284.
- 5) 松居吉哉：“光学系公差の合理的決定方法について”，光技術コンタクト，**4**, No. 2 (1966) 13-17.
- 6) 松居吉哉：“考慮すべき特性値が多い場合の公差の決め方”，品質管理，**25**, No. 4 (1974) 24-28.
- 7) 今井利廣、池田義嗣：“偏芯公差決定方法”，光学，**6** (1977) 228-231.
- 8) M. P. Rimmer: “Analysis of perturbed lens system,” Appl.

- Opt., 9 (1970) 533-536.
- 9) M. P. Rimmer: "A tolerancing procedure based on modulation transfer function (MTF)," SPIE, 147 (1978) 66-70.
 - 10) D. G. Koch: "A statistical approach to lens tolerancing," SPIE, 147 (1978) 71-82.
 - 11) R. S. Hilbert: "Semi-automatic modulation transfer function (MTF) tolerancing," SPIE, 193 (1979) 34-43.
 - 12) D. Forse: "Statistical tolerancing for optics," SPIE, 2775 (1996) 18-27.
 - 13) P. Drake: "Auto-tolerancing on optical systems (six-sigma approach to designing optical systems)," SPIE, 3130 (1997) 136-147.
 - 14) 小島崇司, 長澤 熱, 樋口達治, 望月雅光, 梅田政信, 章志華: "機械系のばらつき設計を中心としたカメラの鏡筒ユニットの設計支援システム", 情報処理学会誌, 38 (1997) 131-143.
 - 15) V. Srinivasan and M. A. O'Connor: "On interpreting statistical tolerancing," Manuf. Rev., 7 (1994) 304-311.
 - 16) V. Srinivasan and M. A. O'Connor: "Towards an ISO standard for statistical tolerancing," Proc. 4th CIRP Des. Seminar (1995) pp. 159-172.
 - 17) D. A. Marco and C. L. McGowar: "IDEF0/SADT business process and enterprise modeling," Electric Solutions (1993).
 - 18) 奥野忠一, 久米 均, 芳賀敏郎, 吉澤 正: 多変量解析法 (日科技連出版社, 1971).
 - 19) 奥野忠一, 芳賀敏郎, 矢島敬二, 奥野千恵子, 橋本茂司, 古河陽子: 続多変量解析法 (日科技連出版社, 1976).

(1999年8月18日受理)