

光学系の公差解析

池田 優二

2000年10月8日

1 はじめに

これまで、光学系が観測データを劣化させる要因として、常盤(きょう体)やホルダー(セル)の姿勢差によるたわみの効果とそれらを抑えるための設計については既に述べてきたが、素子やそれらを納めるセルの製作誤差による影響についての総合的な評価は行っていなかった。

今回、既に設計が済んでいる光学システム全体の公差解析を行ったのでその結果について報告を行う。本結果は、今回依頼したきょう体および内部磁具をシステムの精度が出るように組み上げて行く上で、参考となるはずである。

2 公差の種類とその要因

システムがすべて設計通りに製作することができれば、基本的には設計通りのパフォーマンスを実現できるはずである。しかしながら、システムを構成するそれぞれの部品の製作精度、そして組み上げる際の位置や力のかかり具合等の精度などの影響によって、期待したパフォーマンスにはまず届かない。実際には、これら精度も含めた上で必要なパフォーマンスが達成できるように設計を行わなければならない。そのとき、「許されるべき誤差」というものが定義され得るが、それらをまとめて公差という。

光学システムにおいては、主なるもの(特にシステムの精度劣化の原因となり易い公差)として3種類の公差が考えられる。以下、それらの定義と要因について簡単に紹介する。

2.1 厚み(位置)公差

これは、光学素子単体の厚みや異なる素子間の距離の公差である。素子単体の場合は、まさに素子の製作誤差に起因する。素子間の距離を変化させる要因としては、セルの製作誤差や常盤の素子取り付け螺位置の誤差が主なるものである。

2.2 光軸ずれ公差

これは、定義される光軸からの素子のずれの公差である。レンズや曲面ミラーなどにおいては非常に重要な公差である。セルの製作誤差に起因する場合はほとんどである。

2.3 傾きの公差

これは、素子の傾きの公差である。ミラーの場合は、傾きのエラーが光線の角度にして2倍になるので特に重要視される。数枚のレンズ(ミラー)によって構成される、群レンズの場合はレンズ単体の公差はもちろんのこと、群全体の傾きの公差も定義できる。これは、光軸ずれ公差についても同様である。傾きの公差は、取り付け磁具と常盤の製作精度や磁具のたわみが原因となる。

2.4 その他の公差

2.4.1 曲率公差

レンズやミラーの曲率の公差。

2.4.2 屈折率公差

光学素子に用いる屈折率の公差である。通常の光学ガラスの場合、特に指定しなくても0.05%の精度で一致していると言われている。

3 公差解析の結果

公差解析には、ZEMAXのtoleranceコードを用いた。これは、例えばこちらの与えた公差に対してモンテカルロシミュレーションを行って、理想的な設計からのずれを見ようというものである。今回、問題を分かりやすく整理するために、偏光子系での公差を分光器スリット上面の像によって、また分光器内での公差をCCD上面の像によって評価した。

3.1 偏光子系

公差を評価したコンポーネントとその内容を以下に示す。

- 第一レンズ(ダブルレット)
 - front-lens(SF8)の厚み、光軸ずれ、曲率半径、屈折率
 - rear-lens(SSK4A)の厚み、光軸ずれ、曲率半径、屈折率
 - lens全体での中心ずれ、傾き
- ウォラストンプリズム
 - プリズム全体の厚み、光軸ずれ、傾き
- 第二レンズ(ダブルレット)
 - front-lens(BALKN3)の厚み、光軸ずれ、曲率半径、屈折率
 - rear-lens(SF15)の厚み、光軸ずれ、曲率半径、屈折率
 - lens全体での中心ずれ、傾き
- 各素子間の距離

- スリット — 第一レンズ間
- 第一レンズ — ウォラストンプリズム間
- ウォラストンプリズム — 第二レンズ間

初期公差として、レンズ単体に対しては厚み $\pm 0.15\text{mm}$ 、光軸ずれ $\pm 0.1\text{mm}$ 、曲率半径 $\pm 0.5\text{mm}$ 、屈折率 ± 0.0005 とし、素子全体に対しては光軸ずれ $\pm 0.2\text{mm}$ 、傾き 1° とした。また、素子間の距離の公差は、 $\pm 0.2\text{mm}$ とした。これらは、比較的容易に達成できると見込まれる公差値である¹。また、公差によるデフォーカスは第二レンズ—スリット間距離を変化することによって像質が最適な位置に変更可能である(補償できる)としてある。これは、第二レンズが可動であることを考慮したものである。

これら公差を許した場合の予想されるスポットダイアグラム半径は、 $11.5\mu\text{m}$ である。公差が全くない場合の半径が $10.5\mu\text{m}$ であることを考えると、ほとんど像を劣化させていないと考えてよい。したがって、それほど気を使わなくとも設計値に近い性能が得られることが期待される。ちなみに、もっとも像質に影響するのは第二レンズの第3面の光軸ずれと第二レンズの傾きである。

3.2 分光器系

公差を評価したコンポーネントとその内容を以下に示す。

- コリメータレンズ(ダブルレット)
 - front-lens(SF8)の厚み、光軸ずれ、曲率半径、屈折率
 - rear-lens(SSK4A)の厚み、光軸ずれ、曲率半径、屈折率
 - lens全体での中心ずれ、傾き
- 45度ミラー
 - 光軸ずれ、傾き
- エシエル
 - 光軸ずれ、傾き
- クロスディスパーザ
 - 光軸ずれ、傾き
- 各素子間の距離
 - 分光器スリット面 — コリメータレンズ間
 - コリメータレンズ — エシエル間
 - エシエル — クロスディスパーザ間

¹レンズの厚み公差は、メリスグリオが公称値として与えているものから推測した。

レンズ系及び各素子間の距離については、偏光子系に与えたものと同じ公差値を用いた。また、45度ミラー、エシエルクロスディスペーザの角度公差については非常に小さな値が要求されることが予想されたので、すべて 0.1° とした。またデフォーカスはカメラレンズの焦点距離を変化させることによって補償可能とした。

公差解析の結果、ダブレットコリメータの各レンズの公差(厚み、曲率半径、屈折率)が大きく効いていることが分かった。レンズ全体の傾きも若干影響を与えていた。45度ミラー、エシエル、そしてクロスディスペーザの傾きも全体のエラーに影響を与えていたが、既に 0.1° という公差を与えているので、これ以上の追いこむのは難しい。レンズの公差をさらに絞る事によって、像質の向上を試みた。何度か計算を繰り返した結果、厚みの公差 $\pm 0.125\text{mm}$ 、曲率半径の公差 $\pm 0.1\text{mm}$ 、屈折率の公差 ± 0.0002 、レンズ系全体の傾きの公差 $\pm 0.3^\circ$ であれば、理想像スポットダイアグラム半径 $9.1\mu\text{m}$ に対し、予想スポットダイアグラム半径 $11.8\mu\text{m}$ まで追いこむことができた。コリメータレンズは、市販品であるが公表されている公差は厚みのみである。上記公差値は、一般的にはそれほど厳しい値でないと思われるが、業者が公差値として与えていない以上、受け取った製品が上記公差から洩れることは十分ありうることである。購入した製品の質が悪かった場合には、再購入(8万円程度)という手も考えた方が良くかもしれない。

4 まとめ

光学系全体の公差解析を行った。その結果、偏光子系については素子および、ホルダー(常盤)の公差は非常に緩く、組み上げの際にもそれほど難しくないと予想された。一方、分光器系の45度ミラーと分散素子の傾き公差が 0.1° を要求することが分かった。調整時には、特に分光器系素子の角度を注意深く追いこむ必要がある。そのための、手順手法についてもあらかじめ検討しておく必要があるだろう。

素子そのものの公差に関して言えば、コリメータレンズが要請公差からもれる可能性があることが分かった。業者は正確な公差を与えていないので、購入したレンズに対しては、測定によって設計値との違いを確かめて、その上で像質への影響を見る必要がある。