「自動化」状態を実現する方形内と円形内のエネルギー試験

ケント・ウィード、トニー・ホロウェイ

方形内と円形内のエネルギー（EE）試験法はしばしば見過ごされるが、このような開口内部の光エネルギーの割合を定量化する試験法は、干渉法やMTF試験装置に比べると、より高い精度、応用の柔軟性および費用対効果を確保できる。

光学技術者の多くは単一波長干渉計や多色変調伝達関数（MTF）試験から集めたデータに依存して光学システム性能を定量化し、顧客の設計仕様の遵守を保証している。しかしながら、方形内と円形内の光エネルギーを定量化する試験法は多くの場合に見過ごされているが、高い測定精度、応用の柔軟性および費用対効果を得ることができる。このような方形内／円形内エネルギー（EE）試験は、とくに測定する方形内や円形内のエネルギーの割合が焦点内の全エネルギーよりも小さい点光源の画像を形成する光学系の性能評価の重要な手段になる。

EE試験の利点

EE試験は光学系の焦点面にある焦点内部のすべての光よりも小さい（しばしば画素サイズの）開口内部の光量を簡単な方法で測定する。実用的に言うと、EE値が高いほど、焦点内部の光は強固に集束される。

EE試験法を利用すると、光学技術者は広いスペクトル領域での光学系の試験が可能になり、通常は必要となる特定波長の干渉計に対する高額の投資が不要になる。この試験法は新しくはないが、コストが高く、複雑で、汎用性に難点があった。しかし、最近の計算制御自動化を用いたハードウエアとソフトウエアの進歩によって、現在の光学技術者はEE測定を容易に使用できるようになり、焦点通過EEと焦点深度、像面湾曲と像面傾斜、ボアサイト、視野(FOV)、ゆがみ、有効焦点距離（EFL）、フランジ焦点距離（FFL）、相対照度、一般的焦点のサイズと品質などのレンズ光学系の性能パラメータをわずか1回の自動化された試験から決定できるようになった（p.19の「EE試験データから得られる光学性能パラメータ」を参照）。

試験装置

EE試験装置には適切な波長の光源が含まれ、その光には有限距離のコリメ

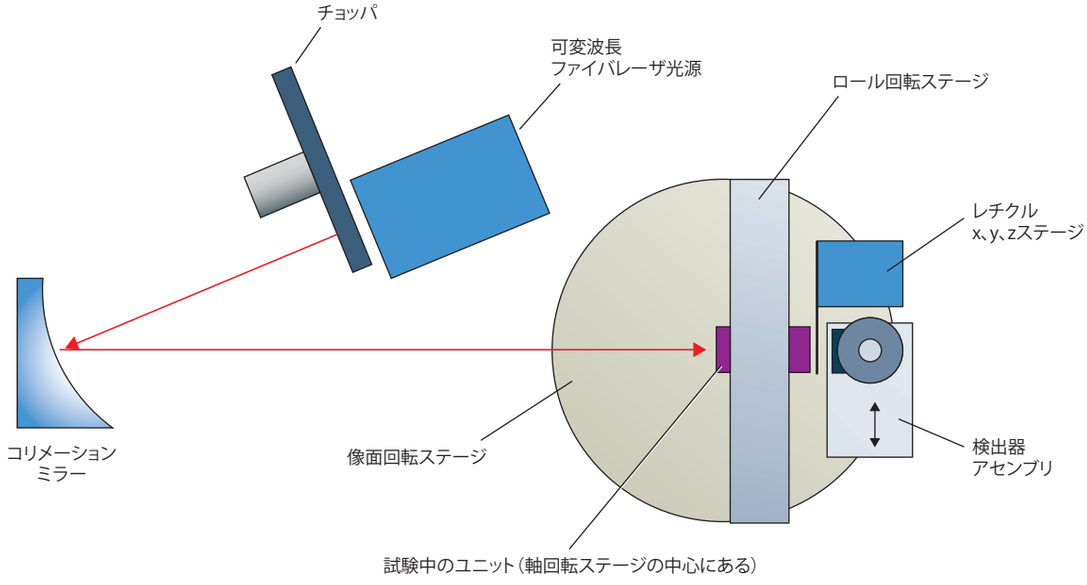

図1　方形内/円形内エネルギー（EE）試験の装置を示している。

ーションまたは結像が行われる（図1）。この試験を測定レンズ系のすべてのFOVに対して適用するとすれば、光源とレンズとのどちらかを用いた相対位置決めが必要になる。このことは二つのチップ-チルト型マウントまたは二つのロータリーマウントを使用して試験レンズを動かすことで容易に実行できる。また、自動計算制御による自動ステージを試料台に使用すれば、必要な多重測定も可能になる。

EE試験は照明光源の選択によってさまざまな柔軟性が得られる。EE法は狭帯域試験も実行できるが、色収差を対象にしたマルチスペクトル試験に使われることも多い。代表的な光源には白色光、帯域通過フィルタ光、狭帯域フィルタ光、レーザ光、モノクロメータを用いた光などが使われる。当然のことだが、検出器には十分な光が到達し、高い信号対雑音比（SNR）が確保されなければならない。試験装置にチョッパやロックイン増幅器を使用すると、試験装置のSNR が大幅に改善される。

EE試験装置の代表的な配置は、レンズと軸回転ステージを接続するマウントが設計上の要点になる。多重レンズを試験し、そのボアサイトが重要になる場合は、この接続を動的にしてビームアライメントを行う必要がある。同様に、FFL測定が必要になる場合は、軸位置決めの較正を考慮しなければならない。

レチクル

すべてのEE試験装置は試験対象の光学系から入射する光線の通過や阻止に用いる焦点面レチクルが中核部品になる。代表的なレチクルは方形または円形の開口のパターンから構成されるので、方形または円形内部のエネルギ

EE試験データから得られる光学性能パラメータ

パラメータ	方法
焦点通過EEと焦点深度	EEをいくつかの異なる焦点通過位置で測定してレンズの焦点深度を計算する。
像面湾曲	像面の各点の位置と最適焦点軸位置を測定して像面湾曲を決定する。
像面傾斜	像面傾斜は像面湾曲と同じデータを用いて決定できるが、平均最適面とその所望の光学軸に対する角度から決定する方法もある。
ボアサイト	レンズマウント角度が分かればレンズ系のボアサイト角を決定できる。もう1つの方法は軸上焦点位置を測定し、レンズを自動ステージで180°回転して、焦点位置を再度測定する。ボアサイトの誤差は移動した焦点の距離の半分になる。この方法を用いると50 μradのボアサイトシフトを解像できる。
焦点の中心	「ワールド開口」のエッジ、意図して設計した大きい開口のエッジ、または別の目的で設計したスリット開口のエッジを使用し、焦点を直交方向に走査すると、焦点エネルギーの中心を決定できる。
ゆがみ	焦点の中心を決定し像面角を算出すれば（レチクル用ステージとレンズ像面回転ステージの精度と再現性に依存する）、レンズの横方向ゆがみを計算できる。
有効焦点距離（EFL）	EFLは光源に対するレンズの像面角（像面回転ステージ）およびレンズ焦点面のレチクル位置から求めた像高を使用して決定できる。
フランジ焦点距離（FFL）	レンズマウントをレチクル距離に対して較正すると、像面湾曲と像面傾斜を含めたFFLを高い精度で決定できる。
相対照度	EE試験からの信号強度を用いると、試験中のレンズの相対照度を評価できる。
一般的焦点のサイズと品質	上述した焦点中心を求める方法を利用すると、コマなどの焦点の一般的な収差の付加的情報のいくつかを解読できる。
迷光	「ワールド開口」を使用して所望の像面位置を走査すると、迷光の検出と評価が可能になる。

一試験が必要になる。開口形状が異なると異なる試験法が必要になる。円形開口からは「円形内エネルギー」データが得られ、方形開口からは「方形内エネルギー」が得られる。光学系の多くは方形画素の焦点面を利用するので、方形エネルギー（方形レチクル開口を使用）は最も一般的な選択になる。

必要なレチクルは二つの基本的な方法、つまり、ガラス基板上の金属膜（クロム・オン・ガラスなど）または空気孔の開口をもつ平坦金属板を使用して製作される。ガラス基板上の金属膜の場合は、金属膜を十分な不透明状態にして、望ましくない信号とその結果としての迷光を完全に遮断しなければならない。開口内部のガラスの良好な反射防止コーティングも試験スループットの最適化には望ましい。空気開口をもつ平坦金属板はガラス基板上の金属膜のピット欠陥を回避できる。しかし、現在のガラス基板上金属膜の製作技術は金属基板中の空気孔よりも大幅に正確な開口を製作できる。

レチクルは2つ（またはそれ以上）の開口の動作を可能にして、EE測定における比率の値を取得しなければならない。より小さい開口群は「画素開口」と呼ばれ、より大きい単一開口は「ワールド開口」と呼ばれる。ワールド開口は画素開口に比べてサイズが10倍も大きく、その位置は画素開口の位置に比べて少なくとも10倍の距離になる。専用の画素／ワールド開口の設計と購入は安価に実行できるが、現在は他の形状のレチクルも使用できるので、さまざまな方式の試験を行うことができる。例えば、直線エッジをもつ大きい開口はナイフエッジ走査に、スリット開口は焦点の「スリット走査」に、焦点よりはるかに小さい開口は焦点の強度分布のマッピングに使用できる。

前述したように、レンズのFFL測定が必要になる場合は、試験装置の最終組立時にレチクル表面の位置の較正が必要になる。この較正によって、試験装置の許容範囲内でのレチクルの適切な距離の配置とレンズ軸に対する垂直移動が保証される。

検出器の位置決め

試験では波長に対する検出器の感度が重要になる。また、検出器特性の面内均一性も考慮しなければならない。検出器は位置決めを厳密に行い、すべての検出を同じ面積で行い、受光角を所定の範囲内に収める必要がある。実際の焦点はレチクルの場所に結像し、検出器は大量の光を必要とするので、検出器上の焦点サイズをできるだけ大きくし、場所の影響を平均化しなければならない。

テレセントリックレンズを試験するときのレチクルと検出器は焦点上を一緒に移動できるが、その他のレンズを試験するときの検出器はレチクルと独立した移動が必要になる。二重軸回転ステージの一軸目を用いて視野角を決め、二軸目を用いて試験レンズの回転位置を決める場合は、検出器に必要となる個別の移動を単一線形移動に抑えることができる。

制御用のソフトウエアのプログラミングは時間のかかる作業だが、EE試験に必要な膨大な時間はレンズ当たりの試験場所の数と試験レンズの数に対応して節約できる。プログラミングの前段階では較正の必要性、レチクルの位置決めの方法、焦点中心の位置決め法、試験対象物の最適焦点位置を見いだす過程などの検討が重要になる。プログラミングでは標準的な合否の判定基準を超えたデータ出力フォーマットの考慮が必要になる。その他の像面傾斜、像面湾曲、相対照度などのデータもレンズ性能の診断に役立つ。

実際の試験データの収集

試験データの収集過程は簡単な概念にもとづいているが、その詳細は複雑な場合が多い（図2）。一般には軸上の位置のデータが最初に収集される。こ

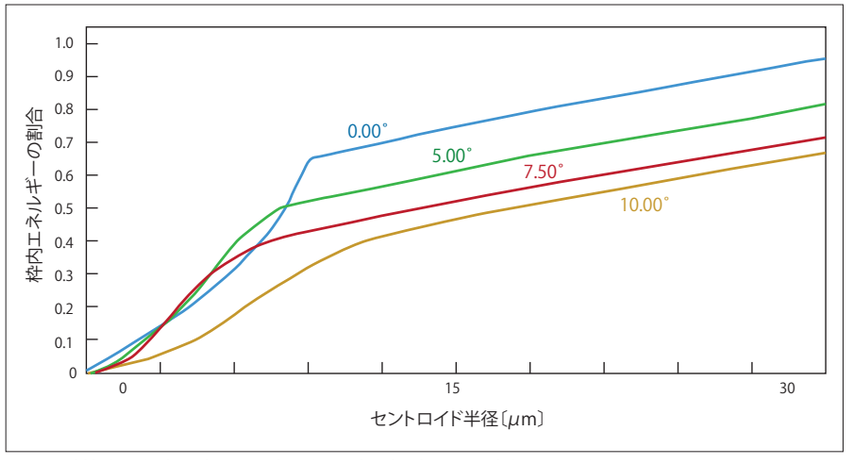

図2　計算された方形内/円形内エネルギー（EE）と開口半径との関係を示している。それぞれのプロットは異なる視野点（0.00°、5.00°、7.50°および10.00°の像面角に対応する）を表す。水平軸は捕集開口（円形内エネルギーの場合）の半径を、垂直軸は円形内エネルギー（Zemaxによる枠内エネルギーの表現）を示す。このシステムの場合、30μm開口（半径15μm）を通過する円形内エネルギーの設計値は、0.0°が約75%、5.0°が約62%、7.5°が約52%、10.0°が約46%になる。

の場合、試験レチクルのワールド開口は仮定された像面の中心に位置決めされる。試験装置が適切にアライメントされている場合は、レチクルの背後の検出器はすべての信号を受信し、その全体光量はワットレベルになる。次に、ワールド開口を左右と上下の方向に走査して、すべての信号の検出を保証する。出力の低下を監視し、焦点の厳密な中心に近い場所を決定して記録する。画素開口の場合、つまり円形内エネルギー用の円形開口と方形内エネルギー用の方形開口は、事前に決定した焦点中心に位置決めをする。この場合のレチクルも左右と上下の方向の走査を行なうことで、ピークエネルギー（焦点の最高温度の部分）の検出が保証される。

ボアサイトを試験する場合の位置は、較正した軸上ボアサイトの位置との相関にもとづいて、その位置の合否を判定する。次に、この位置のエネルギーを測定して記録する（この場合もワットレベル）。この視野位置の方形内／円形内エネルギーは簡単な値、つまり測定したワールド開口エネルギーに対する画素開口エネルギーの比になる（図3）。さらに、すべての過程をレンズに接近した1つまたは2つの位置とレンズからわずかに離れた1つまたは2つの位置で反復し、これらのデータを使用して、この像面点に対して最適な焦点位置を決定する。最後に、測定のために付加するそれぞれの像面位置に対して、すべての過程を反復する。

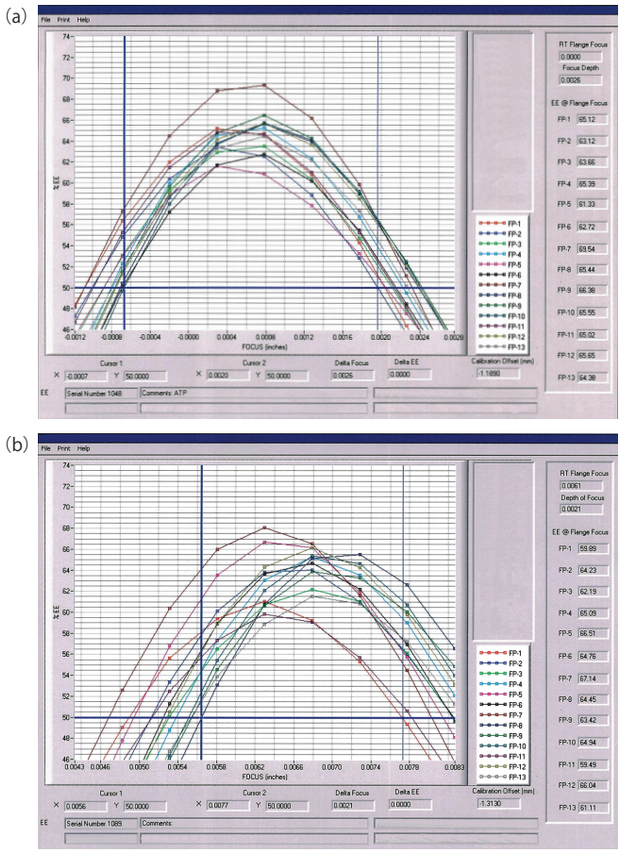

図3　このEE試験装置の出力データは各曲線が約13の像面点の焦点通過EEを表している。FP-7は軸上、FP-4、6、8、10は端部への途中、FP-2、5、9、12は視野の端部、FP-1、3、11、13は視野の中心に相当する。それぞれの視野点曲線の相対ピーク集光位置を比較すると、像面傾斜や像面湾曲などの診断が可能になる。（a）は像面が相対的に平坦な非常に良い結果を示しているが、（b）は像面傾斜と像面湾曲の両方が現われている。

代表的なコスト要因

EE試験の場合、その最も一般的なコスト要因は、試験フィールドの数、スルーフォーカスの数、必要となるステージ精度、レンズマウントのサイズ／複雑さ、FFLおよび／またはボアサイトデータの必要性の有無、光源と検出器の種類、期待されるSNR、結果に影響を及ぼす迷光などが含まれる。とくに多数の試験が長期に予定される場合は、試験装置の安定性と再現性を保証する「黄金の装置」を製作して保有することも非常に好ましい。

見落とした試験の選択肢の発見

特注された複雑な光学系を設計する場合、顧客の多くはEE試験がその光学系に適用できることを知らない。最近、米ライトワークス・オプティクス社（LightWorks Optics）は、NASA、国防総省およびいくつかの民間顧客に対して、彼らの光学プログラムの製品検証段階において、光学系仕様のなかで推薦されている従来の試験法の代わりに、EE試験の実施が望ましいことを提案した。これらの顧客はいずれも十分すぎるほど驚いて、従来の波面またはMTF試験からEE試験に切り替えたときのコストの増加と性能の利点を知ろうとした。現在の自動化された計算制御によるEE試験の柔軟で広範囲のデータ収集機能は、この見落とされることの多い試験法を実行可能な選択肢にしている。光学技術者が使用すると、測定精度の改善と費用対効果を立証された光学性能で手にできる。

著者紹介
ケント・ウィード（Kent Weed）は米ライトワークス・オプティクス社（LightWorks Optics）の技術担当副社長、トニー・ホロウェイ（Tony Holloway）は同社の製造試験担当スーパーバイザ。
e-mail: kweed@lwoptics.com　URL: www.lightworksoptics.com.

LFWJ