技術論文

動作温度範囲における自動車用レンズの画質性能を検証するための革新的な試験方法

ヒラリー・M・バロネック
Optikos Corporation、107 Audubon Road、Bldg. 3、ウェイクフィールド、マサチューセッツ州01880

概要

新車への光学式安全システムや運転支援機能の普及に伴い、自動車業界における電子画像システムの使用は飛躍的に増加しています。車載カメラに対する厳しい環境要件により、幅広い動作温度範囲におけるカメラの画質試験の必要性が高まっています。カメラアセンブリの機能試験および耐久性試験は比較的容易であり、従来の環境チャンバーで実施できます。しかし、温度変化に対するレンズの結像性能の評価は、ハードウェア性能が設計意図を満たしているかどうかを評価する上で非常に重要であり、より困難な計測上の課題となります。レンズはチャンバー内に収納する必要がありますが、チャンバー自体が評価対象の画質に悪影響を与えてはなりません。また、周囲露点以下の温度で動作させる場合は、光路における結露を防ぐための対策も講じる必要があります。 さらに、温度試験において重要な指標である温度による焦点ずれの測定には、チャンバーが測定された焦点シフトに寄与していないことを確認するために、慎重な検討が必要です。本稿では、これらの課題を考慮し、-25℃～105℃の温度範囲でレンズの画質指標を測定できる革新的なシステムについて説明します。このシステムは、過去数年間で社内専用の実験室から最近リリースされた商用製品へと進化しており、広範なテストの結果、測定値とモデル化された動作との良好な相関関係を示す結果を紹介します。

キーワード：画質、自動車、変調伝達関数、計測

1. はじめに

過去10年間に製造された車両には、おそらく少なくとも1台のカメラが搭載されており、現在製造されている車両には複数のカメラが搭載されている可能性が高いです。自動車へのカメラの搭載は当初は目新しいものでしたが、高解像度カメラアセンブリの普及と着実なコスト低下により、カメラは急速に自動車の重要な安全機能に統合されるようになりました。現在、多くの政府機関は新車にバックアップカメラの搭載を義務付けており、歩行者自動緊急ブレーキ、死角検知、車線維持/逸脱警報といった新しい安全機能は、カメラの使用に大きく依存しています。近年では、カメラは自動運転車の開発における重要な技術となっており、人間の視覚を代替するカメラなしには最高レベルの自動運転は実現できないという見解が広く共有されています。

より多くのカメラが一般消費者向け自動車に統合されるようになり、特に重要な自動車安全機能に統合されるようになると、画質とそれが自動車業界にどのように関係するかを慎重に検討する必要が生じます。車載カメラは、歩行者と消火栓を区別するために視野全体にわたって十分な詳細を解像する必要があるだけでなく、最も厳しい環境条件、特に車両の動作温度範囲において、十分に高いレベルの画質を維持する必要があります。自動車で使用されるカメラは通常固定焦点であるため、カメラの動作は、耐用年数全体およびあらゆる条件下でカメラが受動的に焦点を維持できるかどうかに大きく依存します。カメラが広い温度範囲にさらされる場合、これを実現するのは困難です。なぜなら、システム設計で適切に考慮されていない場合、機械材料や光学材料の熱膨張や屈折率の熱変化によって、焦点ずれが主要な収差になりやすいからです。この挙動はカメラシステム、特に設計によって非常に複雑な熱挙動を示すレンズについてモデル化できますが、理論モデルは必然的に単純化された仮定に基づいており、ヒステリシスや非線形挙動を正確に考慮していない可能性があります。設計検証の必要性から、カメラメーカーやシステムインテグレーターは、カメラアセンブリとそのコンポーネントの両方について、温度変化に対する画質の試験を求めています。

カメラアセンブリ全体の熱挙動は複雑であるため、レンズのみを温度に対してテストできることは、カメラ設計が設計意図を満たしているかどうかを理解する上で非常に重要です。カメラが温度に対して期待どおりに動作しない場合、レンズレベルでのテストは、パフォーマンスの違いの原因を特定するための最も有益な方法でもあります。市販の窓付きサーマルチャンバーはカメラの温度に対するテストに使用できますが、レンズの温度に対するテストは、はるかに複雑な計測上の問題です。最近まで、レンズの画質を温度に対して測定し、測定結果に信頼性を持たせる適切な方法は存在しませんでした。Optikosの製品開発チームは、数年にわたる社内テストと自動車業界の顧客との協力を通じて、これらの測定を行う際の特定の課題に対処するサーマルモジュールシステムを開発しました。

2. 背景情報

2.1 レンズの画質評価の概要

温度変化に対するレンズの試験の詳細に入る前に、レンズアセンブリの画質評価に用いられる測定の種類について、一般的な理解を深めておく必要があります。画質評価には様々な測定方法が用いられますが、最も一般的な測定方法はシステムの変調伝達関数（MTF）の評価です。MTF測定は、撮像システムが被写体内の様々なサイズの特徴をどれだけ正確に再現できるかに関する情報を提供し、撮像システムの解像度を示す指標としてよく用いられます。

MTFを測定する方法はいくつかありますが、最も効率的で広く採用されている方法は、テスト対象のレンズにサイズが既知でコントラストがほぼ完全な幾何学的物体を取り付け、フーリエ解析を使用して結果の画像のコントラストを空間周波数の関数として評価することです。テスト対象のシステムの視野内のさまざまなポイントに幾何学的物体を配置することで、軸上および軸外でMTFを測定し、画像の中心から端にかけて画質がどのように変化するかを判定できます。また、図1に示すように、光軸に沿ったさまざまな平面で MTF を測定し（「スルー フォーカス」）、特定の空間周波数のデフォーカス曲線としてプロットすることもできます。軸上および軸外のデフォーカス曲線の集合を使用して、最高のMTF値（つまり最高の画質）を生成する画像平面の位置を判定できます。

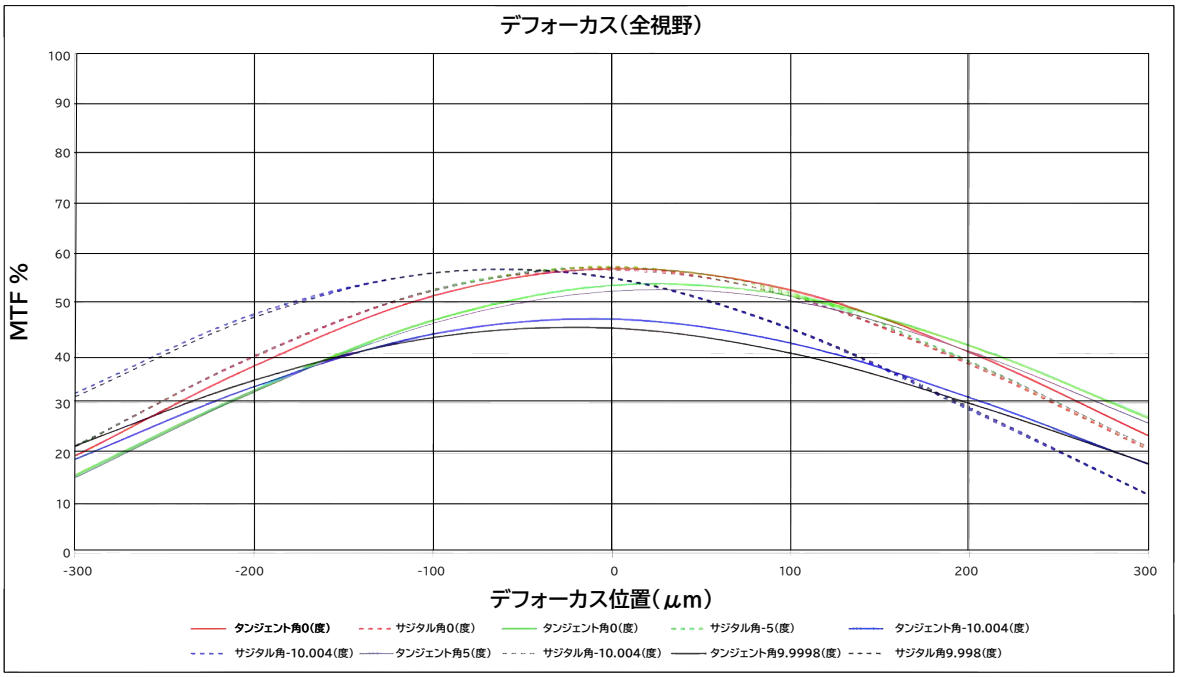


図1 イメージングシステムの視野全体にわたって行われたフォーカス MTF測定を使用して、特定の空間周波数の焦点外れ曲線を作成できます。

MTFは、光学モデリングによって正確に予測でき、設計公差のオペランドとして組み込むことができるため、撮像システムの画質評価によく用いられます。つまり、測定値を設計予測値と直接比較できるのです。MTFは、ハードウェアの性能と設計意図を比較するために使用できる唯一の測定項目ではありません。最も基本的な測定項目には、レンズ設計に固有の一次パラメータが含まれており、組み立てられたレンズが理論モデルと一致していることを確認するために容易にテストできます。

パラメータには、入射瞳と射出瞳のサイズと位置、F値などがあります。これらのパラメータを測定することは、レンズの現状性能を評価する際の良い出発点となります。

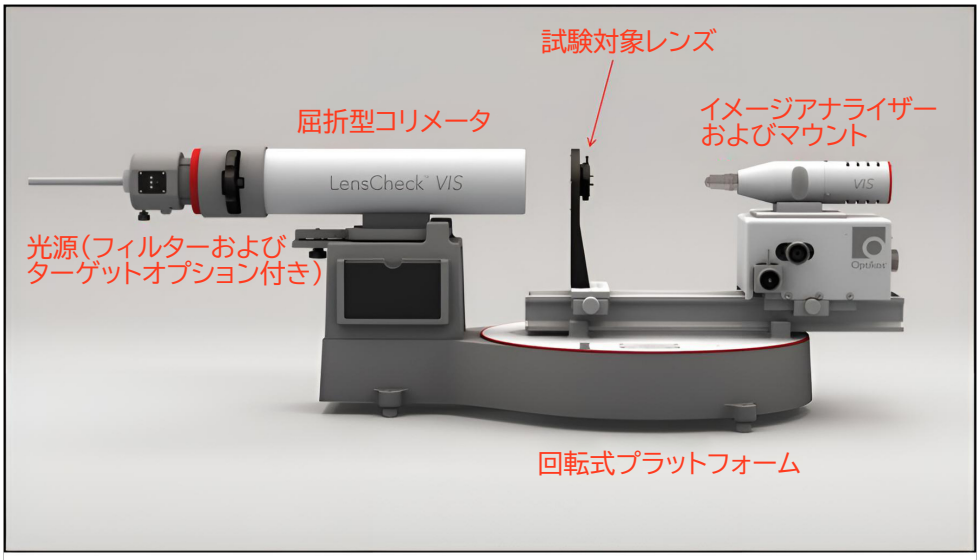
次のレベルのテストには通常、MTFと、像面湾曲、像面傾斜、非点収差、軸上色収差、最終レンズ素子の頂点と像面間の物理的距離（後焦点距離、BFL）、およびレンズ鏡筒の機械基準面またはマウントフランジと像面間の物理的距離（フランジ焦点距離、FFL）などのMTFベースの測定が含まれます。これらの測定では、MTFは最適な焦点位置を決定するための指標として用いられます。MTFに直接基づかないものの、画質に影響を与える可能性のあるその他のテストカテゴリには、実効焦点距離（EFL）、歪曲収差、主光線角（CRA）、横方向色収差などの像位置ベースの測定、および像面全体の信号レベルを比較することに基づく相対照度や迷光などの測定があります。

特定のレンズに対してどの測定を行うべきかは、用途とレンズの設計方法によって異なります。適切に構成されたレンズテストベンチであれば、1つのセットアップで複数のレンズパラメータを測定できる場合が多くあります。温度変化に対するレンズテストでは、フランジバックの変化が主な測定項目となりますが、本稿で説明するサーマルモジュールの設計により、同じ装置を用いて他のパラメータも評価できます。これは、サーマルモジュールが標準的なOptikosレンズテストベンチのアクセサリとして設計されているためです。そのため、レンズテストベンチの仕組みを概ね理解しておくことが役立ちます。

2.2 画質測定用レンズアセンブリテストベンチ

ほとんどのレンズは無限遠にある物体と連動するように設計されているため、典型的なレンズテストベンチでは、コリメートレンズまたは軸外放物面鏡の焦点に幾何学的物体を配置し、被試験レンズから無限遠にある物体を照射します。物体は、所望の試験スペクトルにフィルタリング可能な広帯域光源によって後方照射されます。また、被試験レンズに応じて選択可能な様々なサイズの標準物体（ピンホールまたはスリットターゲット）が複数用意されています。被試験レンズは回転台に取り付けられ、この回転台は、コリメートされた物体をレンズに対して選択可能な画角で照射することで、軸上と軸外の両方で試験を行います。可視スペクトルで試験する場合、レンズによって形成された像は画像解析アセンブリによって拡大され、高解像度センサーに送られ、撮影された後、コンピューターに転送されて解析されます。イメージアナライザアセンブリは3軸ステージアセンブリに搭載されており、オフアクシスおよびスルーフォーカステストにおいて、イメージアナライザを像面内および被試験レンズの光軸に沿って配置することができます。図2は、2つの異なるレンズテストベンチ構成と、それぞれの主要コンポーネントを示しています。

レンズによって形成された画像を画像分析アセンブリで中継して拡大する必要があることが、レンズの温度試験が非常に難しい理由の1つです。レンズは、レンズ温度の安定を確保するためにサーマルモジュール内に収める必要があります。一方、画像分析アセンブリは、その画像性能が悪影響を受けないように、このエンベロープの外側にあっても画像平面にアクセスできる必要があります。この問題は、カメラアセンブリ全体の温度試験では発生しません。画像は統合センサーによって直接キャプチャされ、サーマルチャンバーからケーブルを介してコンピューターに中継されて解析されるためです。ただし、カメラレベルで実行できる解析ははるかに制限されます。測定はセンサー平面でのみ実行でき、センサーの固定サンプリング周波数によって解像度が制限されるためです。レンズレベルでの試験では、レンズの寄与をアセンブリ全体の寄与から分離し、より高い空間周波数で測定を行うことができます。



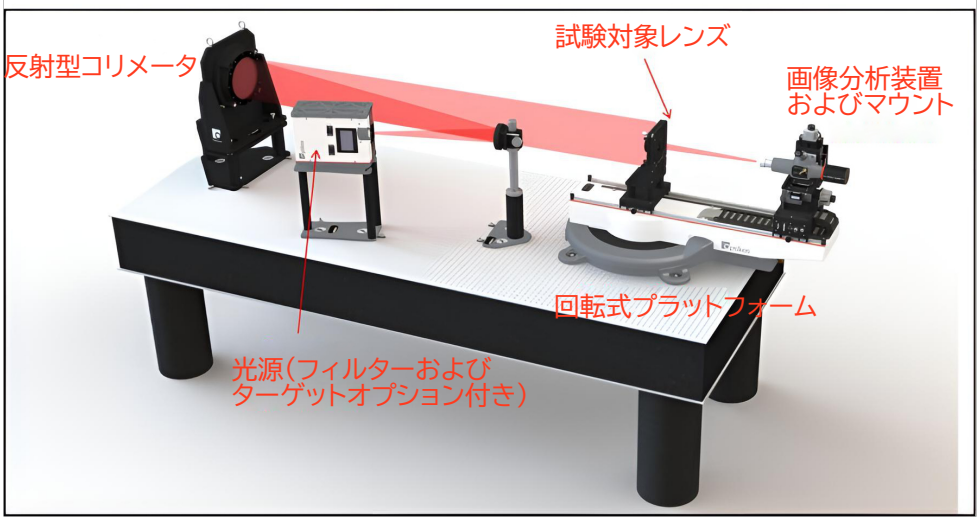


図2 レンズテストベンチの標準コンポーネント。レンズの種類に応じて、異なるベンチ構成が必要になる場合があります。LensCheck™システム(上)は、広い視野を持つ小型レンズに適しており、OpTest®ベンチ(下)は、より広い範囲で大型レンズをテストできます。

3. サーマルチャンバーモジュール

3.1 Optikosサーマルモジュールシステムの概要

Optikos標準レンズテストベンチが提供する画質測定機能を最大限に活用するために、TM-1000サーマルモジュール製品ラインは、図3に示す標準レンズテストベンチのオプションアクセサリとして設計されました。サーマルモジュールは通常のレンズマウントの代わりに使用されます。

サーマルモジュールは熱伝導の原理に基づいて動作し、加熱または冷却された流体を熱交換器を通して循環させることで、試験対象レンズの温度を設定します。他の温度試験方法とは異なり、この方法ではレンズを最低温度まで真空引きする必要がないため、あらゆる種類および用途のレンズ試験に適しています。Optikosサーマルモジュールは、標準ハードウェアを使用して-25℃から105℃までのレンズ温度を実現できます(必要に応じて、温度範囲をさらに拡張するための追加オプションもご用意しています)。

図3 TM-1150サーマルチャンバー(左上)は大型レンズアセンブリ用で、右上に示すようにOpTest®ベンチ回転プラットフォームに取り付けることができます。TM-1050サーマルチャンバー(右下)は、通常LensCheck™ VISテストベンチ(左下)でテストされる小型レンズアセンブリ用です。

3.2 システムコンポーネント

サーマルモジュールシステムは、循環チラー/ヒーター、乾燥空気マニホールドおよび制御ユニット、そしてレンズが取り付けられるサーマルチャンバーの3つの主要コンポーネントで構成されています。これら3つのサブシステムを接続するために、断熱ホースが提供されています。サーマルチャンバーは、試験対象レンズの取り付けインターフェースを提供し、コリメート光源からの光をチャンバー内に取り込むために、前面に取り外し可能な二重窓アセンブリを備えています。また、チャンバーには、レンズの背面(像側)に断熱シャッターアセンブリが設けられており、サーマルソーク時間中にチャンバーを密閉するために使用されます。レンズ温度が安定した後、シャッターが開き、画像分析装置が画像にアクセスできるようになります。チャンバーの主要コンポーネントを図4に示します。

循環式チラー/ヒーターには、レンズ温度を設定するための熱媒液が貯留されています。チャンバーと試験対象レンズの温度は、システムコンピュータによって制御ユニットを介して継続的に監視され、システムコンピュータは循環式チラー/ヒーターと通信して、必要に応じて熱媒液の温度を調整し、所望のレンズ温度を実現します。また、制御ユニットはチャンバーへの乾燥空気の流量を調整して結露を防ぎ、測定ルーチン中にチャンバーの断熱シャッターを制御します。Optikosレンズテストベンチに付属するOpTest®7ソフトウェアアプリケーションを使用することで、自動測定ルーチンを実行できます。

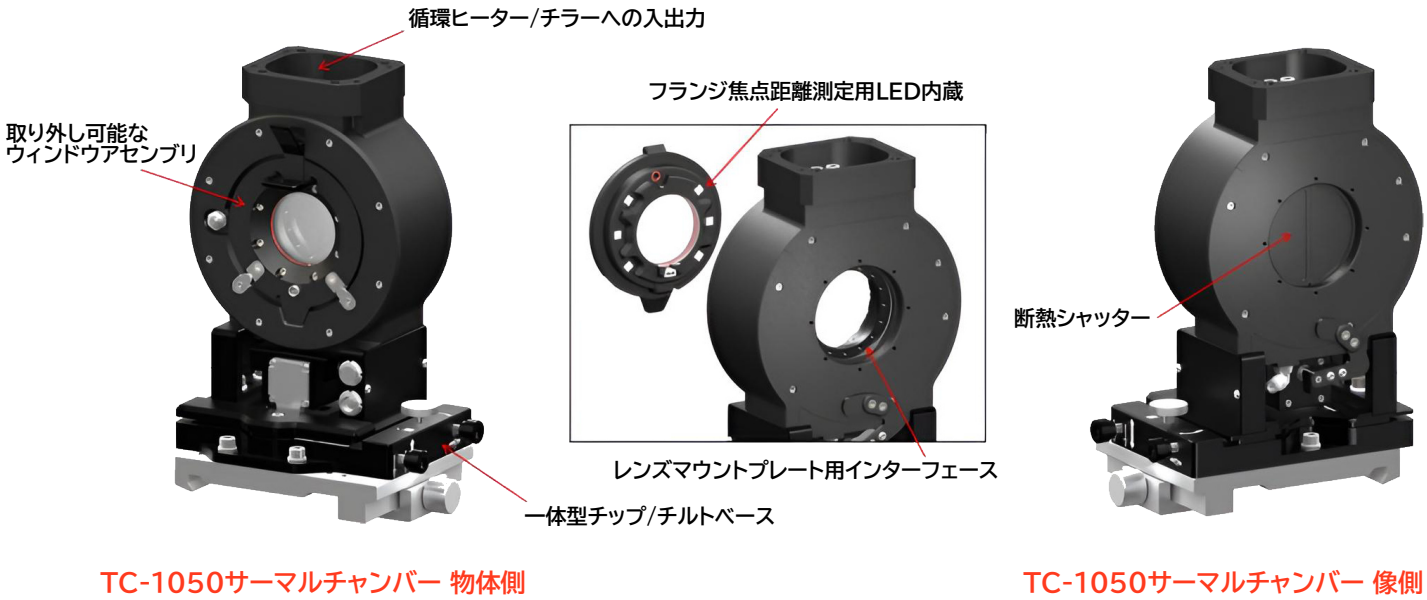


図4 TC-1050 サーマルチャンバーアセンブリの主要コンポーネント（ホースなし）。

3.3 サーマルモジュール設計における考慮事項

Optikosが提供するすべてのサーマルチャンバー設計は、共通の設計特性を持ち、同じ物理的設計課題の解決を目指しています。いずれの場合も、チャンバーは円筒形の熱交換器の概念に基づいており、この熱交換器を通して外部で加熱または冷却された熱流体が循環します。試験対象のレンズはインターフェースプレートに取り付けられ、インターフェースプレートは熱交換器の端部に取り付けられます。試験対象レンズの主な熱伝達メカニズムは、このインターフェースプレートを介した伝導ですが、チャンバー内の空気を介した対流と伝導も重要な役割を果たし、長尺レンズではその重要性が増します。レンズの温度は、小型の白金抵抗温度計（PRT）プローブを用いて測定されます。このプローブはレンズ鏡筒に直接取り付けられますが、非常に小型のレンズの場合は、レンズに隣接するインターフェースプレートに取り付けられます。

最も重大な課題は、最も明白なことです。それは、レンズの結像性能に影響を与える可能性のある変数を導入することなく、レンズを周囲の実験室環境とは異なる温度に保つことです。光はチャンバーに出入りできる必要がありますが、チャンバーの温度と試験対象レンズの温度を維持できるよう、チャンバーは十分に密閉されていなければなりません。Optikosのサーマルチャンバー設計では、高品質の窓を使用することで、入射コリメートビームの波面が維持されます。いずれの場合も（非常に広視野レンズ用に設計されたチャンバーを除く）、入射窓は、小さな乾燥空気ギャップで分離された2つの平行平板溶融石英窓で構成されています。この空気間隔を置いた二重窓配置により、窓間の真空破壊によって必然的に生じる歪みを発生させることなく、窓を通過する熱流をある程度低減できます。広視野チャンバーでは、2枚の窓ガラスからなる入射窓が二重ドーム配置に置き換えられています。

レンズの像側は、集光ビームに何らかの窓を配置すると像に球面収差が生じるため、より大きな課題となります（このルールの例外は、センサーカバーガラスの代わりに薄いガラス片を挿入する必要がある場合です）。また、小型レンズでは、バックフォーカスが短すぎる場合やフランジバックも測定しなければならないという要件が厳しく、窓配置が実用的ではないことも少なくありません。そこで、私たちは機械式シャッターを用いて、サーマルソーキング中に試験対象レンズをチャンバー内で隔離し、測定時にシャッターを必要な量だけ、かつ最短時間だけ開くという手法を採用しました。チャンバー内に外気が存在すると、外気の露点温度以下では結露や霜が発生するため、シャッターを開いている間はチャンバー内を正圧に保つ必要があります。これは、チャンバー内を一定の乾燥空気の流れで維持することで実現され、その流量はシャッターの状態に応じて遠隔制御されます。シャッターを開いた後にテスト対象のレンズの温度が変化することは避けられませんが、測定の自動化により、必要な時間だけシャッターを開くことでこれらの変化を最小限に抑えることができます。

熱交換器部品は、熱流体を循環させ、レンズマウントプレートが取り付けられており、機械加工されたガラス繊維複合材のシェル内に収められています。この硬質断熱層は、チャンバーを2軸チップチルトアライメントマウントに取り付けるための低熱伝導構造を提供するだけでなく、最外面が危険な高温または低温に達するのを防ぐという重要な安全機能も果たしています。硬質断熱シェルの外側には、取り外し可能な軟質断熱層があり、チャンバーの断熱の大部分を担っています。

レンズの試験視野を最大化するには、レンズの入射瞳とチャンバーの入射窓との距離を最小にする必要があります。当社最大のチャンバーであるTC-1150では、チャンバーセグメントを追加または削除することで、試験するレンズに合わせてチャンバーの軸方向の長さを変更できます。これらのセグメントは、硬質断熱材の外側リングに接続された内側の熱交換リングで構成されています。熱流体は、特許取得済みの二重らせん構造で壁構造内の各セグメントを循環します。レンズ取り付け端から窓端まで螺旋状に進み、再びレンズ取り付け端に戻るため、チャンバーの全長にわたって均一な加熱が保証されます。現在提供されている小型のサーマルチャンバーモデルは、一般的な自動車用レンズのほとんどに適合する固定長です。

3.4 温度変化に対するフランジ焦点距離の測定

典型的なフランジ焦点距離の測定では、MTFを最適化してイメージアナライザアセンブリを軸上像に焦点を合わせ、次にイメージアナライザアセンブリを光軸に沿って移動させ、マウントフランジの背面に焦点を合わせ、これら2つの焦点位置間のイメージアナライザステージアセンブリの軸方向変位を記録します。温度変化に対する試験では、この測定はかなり複雑になります。レンズアセンブリ全体が熱平衡状態にあることを確認するために、通常、レンズアセンブリ全体（マウントフランジを含む）はチャンバー内に密閉されます。レンズのマウントフランジは主要な熱伝導経路でもあるため、通常は試験対象レンズを恒温チャンバー内に保持するプレートによって完全に覆われます。

この問題に対処するため、当社のサーマルモジュールシステムは特殊なレンズマウントプレート設計を採用しています。この設計では、マウントプレートの材質としてインバー（熱膨張係数が非常に小さい鉄合金）を使用することで、レンズマウントフランジ上の基準面をチャンバー外に移動しています。インバープレートの厚さの変化は一般的な測定温度範囲では無視できるため、プレートの外面をマウントフランジの代替として用いることで、相対的なフランジ焦点距離測定が可能です。フランジ焦点距離測定から出力されるデータは、温度の関数として表されるフランジ焦点距離シフト値のセットです。

レンズマウントプレートの設計に最近追加されたのは、下図に示すように、マウントの外面に2つの裏面照射型クロムオンガラスレチクルを統合した点です。この機能により、OpTest®7ソフトウェアアプリケーションを使用して、温度変化に伴うFFL変動を自動測定できます。クロムレチクル表面が全温度範囲にわたってマウントプレートの外面と面一に保たれるように、レチクルは2つの重ね合わせたトランスファープレートに対してスプリングで固定されています。ターゲットの照明は、サーマルチャンバーウィンドウアセンブリに設置されたLEDによって行われ、FFL変動測定に必要な場合にのみ点灯します。レンズマウントプレートの例を図5に示します。

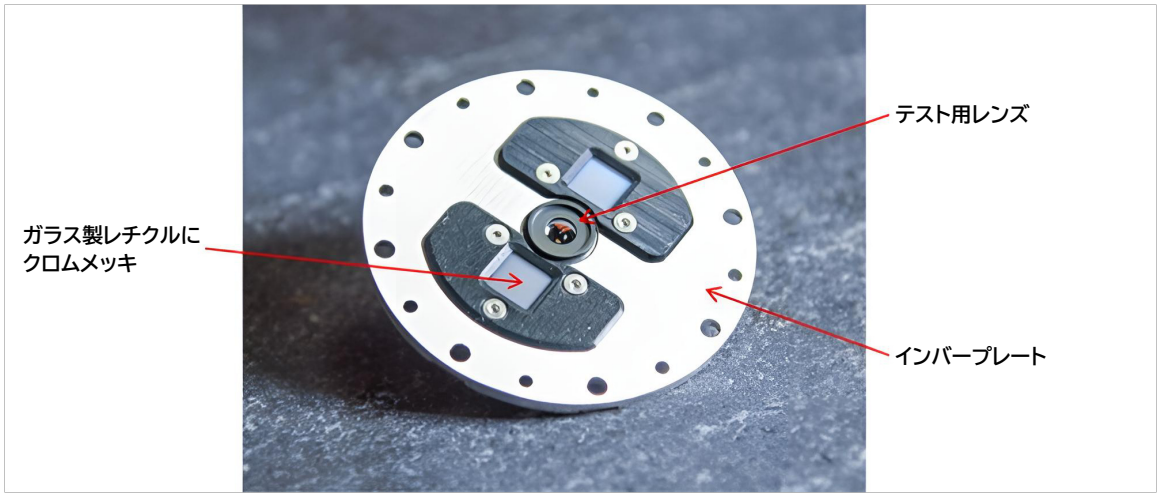


図5 TC-1050サーマルチャンバー用レンズ取り付けプレート

フランジ焦点距離の測定は、その定義上、レンズの取り付けフランジの位置に依存します。フランジ焦点距離の変化を測定する際には、レンズをカメラアセンブリ内のセンサーハウジングに取り付ける際に使用するのと同じ取り付け機構を使用して、インターフェースプレートに取り付けることが重要です。レンズ設計者は設計プロセスにおいてセンサーハウジングの膨張と収縮を考慮しているため、フランジ焦点距離が温度に対して不変であるとは限らないことに注意することが重要です。無熱化レンズ設計のみを測定すると、フランジ焦点距離の変化はセンサーハウジングの長さの変化に等しいことが予想されます。

フランジ焦点距離の変化を正確に測定する能力は、実際にはフランジ焦点距離を正確に測定する能力に依存しません。ここで説明したアプローチでは、インバーマウントプレートの片側を、反対側に取り付けられたフランジの代わりとして使用することを説明しました。この場合、重要なのは測定の再現性であり、これは主に、最適な焦点画像の位置と、機械的な参照面として使用されるガラスレチクル上のクロムの位置の両方を決定するために使用されるスルーフォーカス測定の再現性に依存することがわかります。再現性のあるスルーフォーカス測定には、明確なピークMTF値を持つデフォーカス曲線が必要であり、デフォーカス曲線の形状はテストするレンズの焦点深度に依存します。したがって、f値が低い高速レンズでは、f値が大きい低速レンズよりもフランジ焦点距離の測定結果が再現性が高くなります（ただし、低速レンズは同じ理由でフォーカスシフトの影響も受けにくくなります）。デフォーカス曲線の形状は、レンズの全体的なMTF性能にも依存します。一般的に、画質が低くMTF値が低いレンズは、良好なデフォーカス曲線と再現性の高いフランジバック測定結果を得ることができません。Optikosは、室温で様々なF値を持つレンズのフランジバック測定結果を複数回比較した結果、フランジバック測定における典型的な不確かさは±2μm程度であることが判明しました。

4. サンプル結果

下の図は、Optikos社でサーマルモジュールシステムを用いて行われたフランジバックシフト測定の結果を示しています。一般的な測定手順は、室温（20℃～25℃）から開始し、必要な最低温度まで下げていくというものです。レンズを最低温度から最高温度まで下げる際に測定を行い、温度を上げる途中で室温で別のデータポイントを取得します。測定は、フランジバックの初期値と最終値を比較するために室温で行われた最終測定で終了します。下の図では、3回の室温測定が20℃のデータポイントの集合として示されています。

フランジ焦点距離の測定値から室温での初期測定値を差し引くことで、図6に示すフランジ焦点距離シフトのプロットが作成されます。測定されたフランジ焦点距離シフト値は、±2μmの典型的な不確かさでプロットされています。このレンズの場合、理論上のフランジ焦点距離シフト値は既知であり、測定値と直接比較することができました（理論上の熱シフトは下図に黒線でプロットされています）。

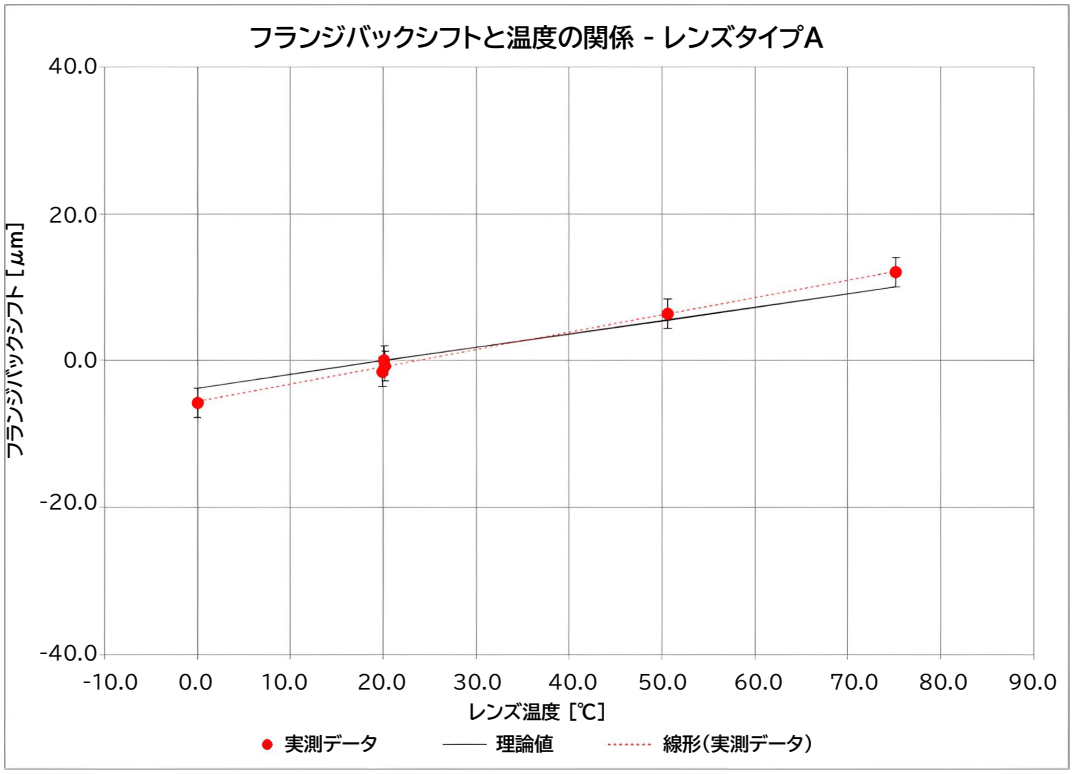


図6 フランジ焦点距離シフトの測定値と理論モデルの比較

測定値は、フランジ焦点距離測定の一般的な不確かさの範囲内で理論モデルと一致しています。しかし、ばらつきはランダムではなく、測定値は理論モデルの予測とはわずかに異なる傾きを持つ直線傾向(上図の赤い点線)を示しているように見えます。したがって、2つのグラフの不一致は測定の不確かさに起因するものではなく、レンズの熱性能が実際には理論モデルとわずかに異なる可能性があります。これは、熱挙動をモデル化できる場合でも、広い温度範囲で動作することが求められるレンズでは、この測定を行うことの重要性を強調しています。なぜなら、レンズがモデル予測通りに動作しない可能性があるからです。

次のデータ例では、同じ設計の5つのレンズ(レンズタイプB)が同じ温度範囲でテストされ、5つのレンズのフランジ焦点距離シフト値が図7にまとめられています。図6と図7の縦軸のスケールが異なることに注意してください。レンズタイプBの熱シフトは、レンズタイプAよりも大幅に大きくなっています。レンズタイプBの熱シフトの傾きも、レンズタイプAとは符号が逆です。レンズタイプAの場合、像面は温度が高いときにはレンズから離れ、温度が低いときにはレンズに近づきますが、レンズタイプBではその逆の動作が見られます。各レンズサンプルの熱シフトは最初に個別にプロットされ、最終的なプロットには 5つのレンズすべての熱シフトが表示されます(見やすくするために、そのプロットではエラーバーは省略されています)。このレンズ設計では、理論上の熱シフト値が不明であるため、以下の個々のプロットに含まれる線は、測定された熱シフトデータへの線形近似です。ここで同じレンズ設計のサンプル間で見られる大きな変動は、プロセスの変動が要因であることを示唆しており、このタイプの測定を行うもう1つの重要な理由を浮き彫りにしています。

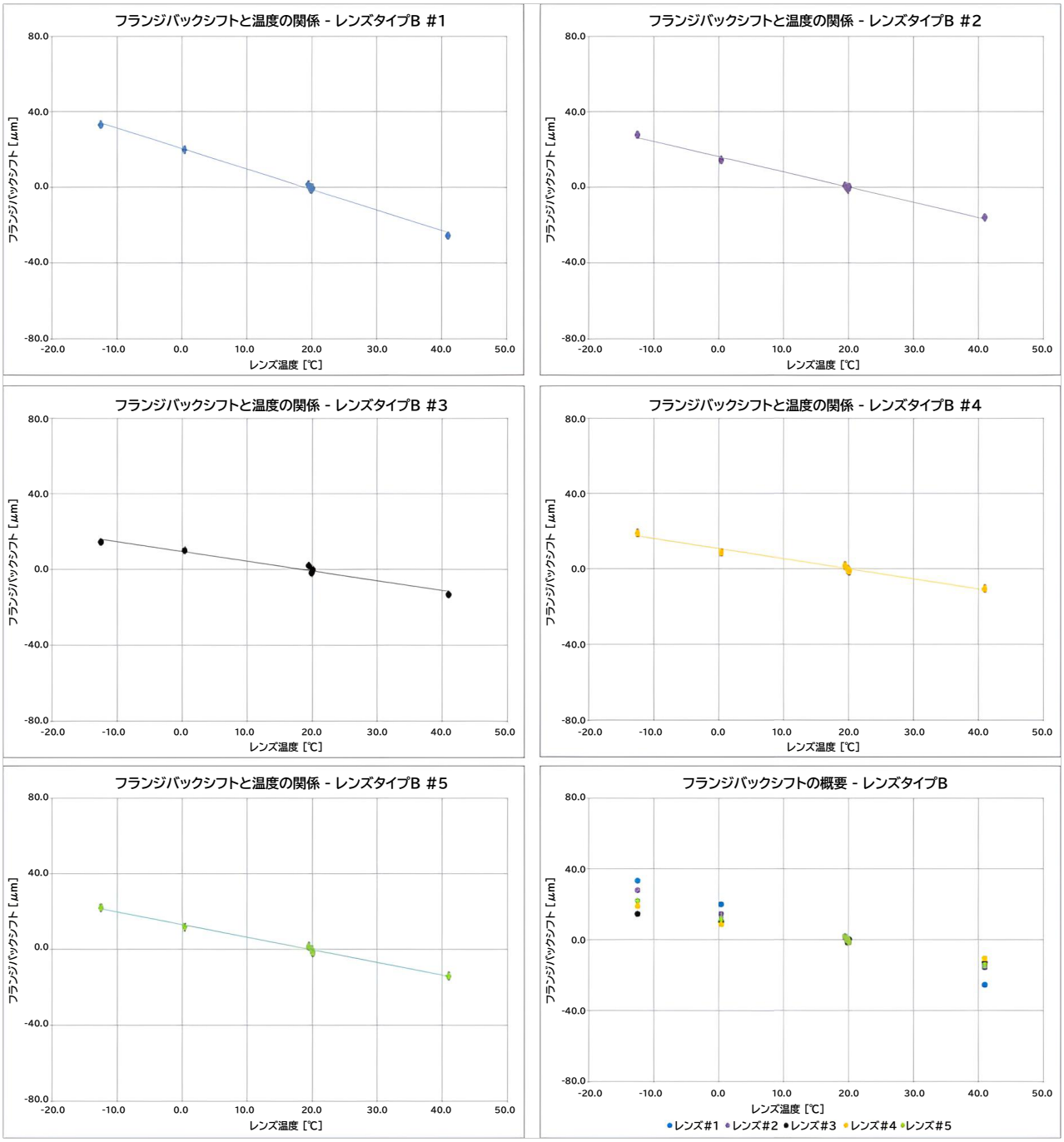


図7 同じ設計の5つのレンズアセンブリ間のレンズタイプB熱シフトの比較

フランジバックシフトは、焦点ずれとして現れ、温度変化によって画質に影響を与える主な収差となることがよくあります。スルーフォーカスMTF測定はフランジバックシフト測定プロセスの一部であるため、このデータは容易に入手でき、MTFが温度によってどのように影響を受けるかを示す有用な情報を提供します。

図8の上段は、レンズタイプCの一連のデフォーカス曲線を示しています。各デフォーカス曲線のペア（1ペアには接線方向と矢状方向のMTFデータが含まれます）は、異なるレンズ温度における同一空間周波数でのスルーフォーカス測定を表しています。デフォーカス0μmの黒の実線は、カメラアセンブリ内でのセンサーの位置を示しています。このシステムでは、センサーとレンズマウントフランジ間の距離は温度に関わらず一定です。室温以下では、センサー面におけるMTF値は比較的一定ですが、温度が上昇するとMTFは著しく低下し始めます。

下のグラフは、この点をさらに説明するために、センサー面における選択された空間周波数の平均MTF値を温度の関数として示しています。注目すべきは、上のグラフのピークMTFや曲線の形状に比較的変化がほとんどないことです。センサーで観測されるMTFの低下は、すべて焦点ずれによるものです。

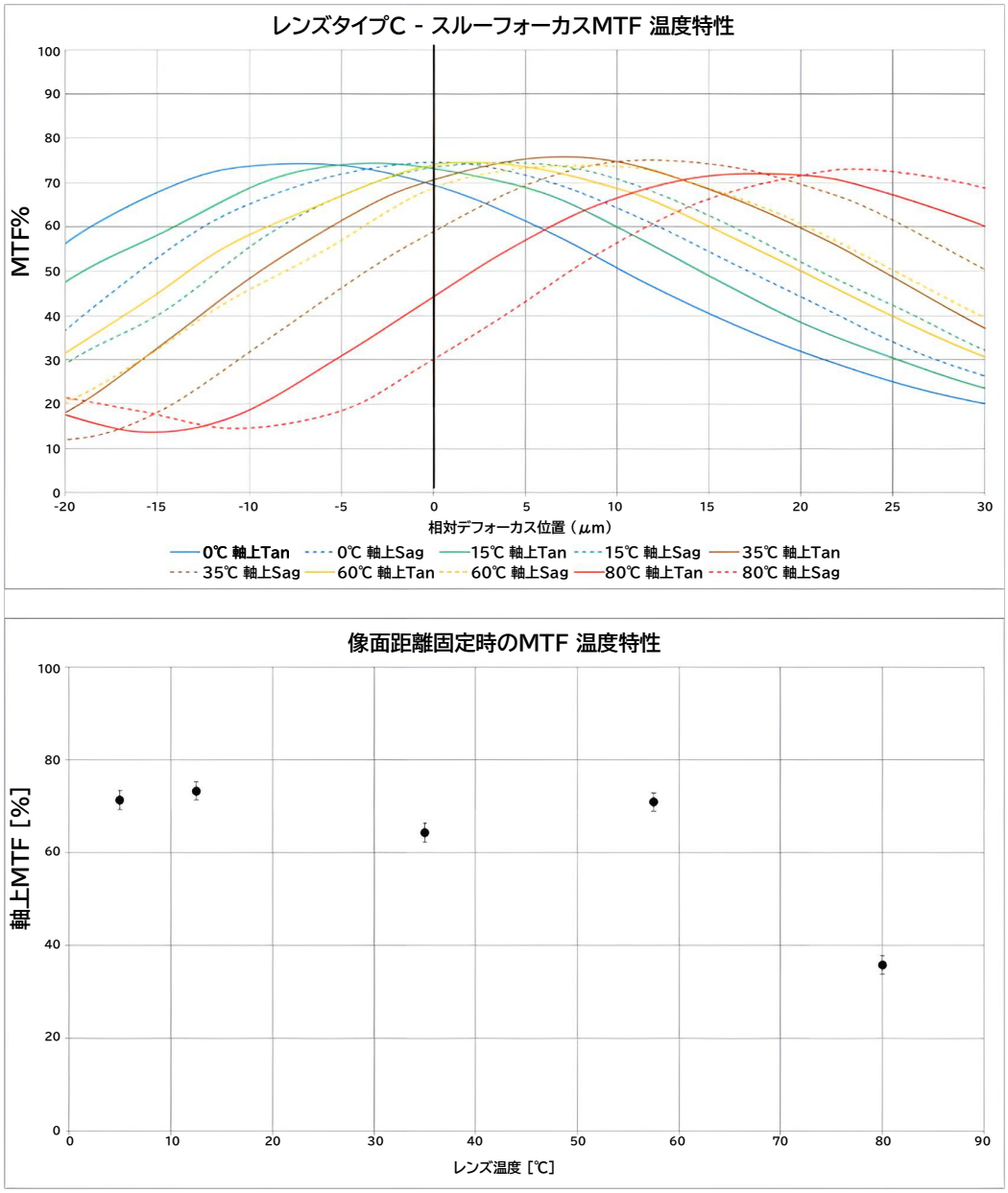


図8 スルーフォーカスMTF測定の温度依存性は、同一平面で評価した場合、顕著な性能低下を示しています。下のグラフは、0μmの位置で評価した上のグラフのサジタルMTFグラフとタンジェンシャルMTFグラフの平均を示しています。

5. 結論

レンズの性能を規定の動作温度範囲で測定できるように設計された高度な装置の商品化は、車載カメラ業界の需要に後押しされた近年の進歩です。測定自体は室温での測定よりも一般的に困難ですが、高性能カメラレンズ、特に自動車の安全システムに適用されるレンズの設計・プロセス検証、トラブルシューティングの手段として、ますます重要になっています。