マルチスペクトルの要求に応える共通開口赤外線イメージングシステム

ブランドン・ライト

光学材料と製造技術の適切な選択は、非常に軽くて安定な共通開口イメージングシステムを可能にする。

従来の赤外線（IR）イメージングシステムは、入手可能な材料のタイプとコーティング能力が制限されていたため、一般に、それぞれ別個の光路をもつ多重光チャネルを使って電磁スペクトルをカバーしなければならなかった。つい最近、二つ以上のチャネルを単一光路の単一チャネルに統合したシステムが開発された。これらは、可視から中赤外（MIR）の範囲で光透過率が高い新規光学セラミック材料を使用している。現在では、広い波長範囲で高透過率が得られる材料が市販されているため、主要な光学部品メーカーはこれらの材料をマルチスペクトルシステムで使用する非球面、球面、プリズム、ドーム形（レンズ）などに加工できる。

共通開口システムの利点

二重チャネルシステムが共通開口レイアウト用に再設計されると、システム中の少なくとも1枚のレンズは全波長を受け取ることになる。例えば、米ロッキード・マーティン社（Lockheed Martin）製のスナイパー照準ポッドは中間波前方監視IR（FLIR）イメージャ、デュアルモードレーザ照準器とトラッカー、そしてCCD-TVを内蔵している。この装置は可視からMIRをカバーする。従来式システムとは異なり、スナイパーの特徴は照準誤差を除去し、超音速でさえ画像安定性を確保できる共通開口にある。これまで2～3必要だった装置をこの1装置で置き換えることが可能で、追加システムも必要ない[1]。その結果、スナイパーはより小型でより軽量なシステムになり、部品数、在庫品目数、管理部品番号が少ないため、コストも低く抑えられる。

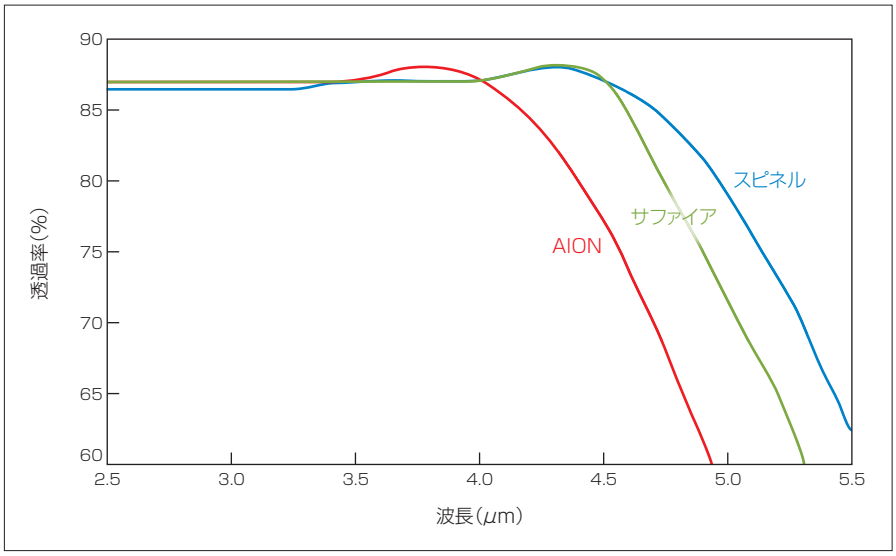

図1　MIR領域におけるスピネル、AlON、サファイアの光透過率はいずれも5μm領域に達している。

材料の考察

フッ化カルシウム、フッ化マグネシウム、フッ化バリウム、サファイア、硫化亜鉛、セレン化亜鉛などの広帯域光学結晶に加えて、新しい光学セラミック材料がIR光学系を設計するエンジニアに選択肢を提供している。現在、スピネル、アルミニウム酸窒化物（AlON）、セラミックYAGなどはすべて入手可能である。これらの材料は耐食性があり、硬度が非常に高く、耐熱性で非金属の無機固体である。光学セラミックは加熱時の膨張が光学ガラスに比べて小さく、そのことが極端な温度変化によって誘起されるシステムミスフォーカスの防止に役立つ[2]。

共通開口設計の透過率要求を満たしている材料は稀である。候補材料となるには、可視からMIRまでの光を透過しなければならない。選択された材料はセラミックAlONとスピネルと結晶サファイアである（**図1**）。これらの材料の透過率は、多少の変動はあるが、いずれも約5μmから低下が開始する。可視からMIRの全域にわたる高透過率が、これらの材料を共通開口システム用として理想的にしている。

耐久性は材料選択時に考察する重要

な属性の一つである。硬質セラミックは過酷な環境に対して耐性があるため、特殊用途に望ましい。光学セラミックはその熱機械特性によって機械的に強いため、高速で反復される極端な温度変化にも耐えられる。例えば、光学ドームは熱衝撃、雨、砂侵食、高速度、航空機着陸の激しい衝撃などに曝されることがある。こうしたドームの製造に使用する光学材料は、システムの動作を遮断または負の影響を及ぼすことなくその部品を持ちこたえさせることが重要である。

サファイア、多結晶アルミナ(PCA)、AlON、およびスピネルはイメージングシステムドーム用の候補材料である。サファイアは耐久性とIR領域における高透過率などの防衛用途に不可欠な性質を持っているが、機械加工が困難で、複屈折を起こしやすい。現在開発中のPCAはサファイアに匹敵する機械特性をもつと同時に等方性材料でもあるため、多くのアプリケーションにおいてサファイアの能力を上回る可能性を持つ[3]。スピネルとAlONは低コストであるにもかかわらず、重量と厚みを汎用ガラス基板の1/2にしても極端な天候に耐えることができる[4]。

製造前の可能な限り早い時期に材料のタイプを決定すれば、材料を注文して受理し、計画要求通りの光学系を完成させるまでの時間にそれだけ余裕が生まれる。光学セラミック材料のリードタイムは、一般に、ニアネットシェイプへ成形するために工作機械を据え付けてから8週間にもわたる。湾曲し難い光学材料を注文する機会がある場合は、より迅速な納入を可能にし、成形のリスクを回避できるスラブ材料が安全な選択肢である。

精密仕上げと成形

硬質セラミック材料は光学ガラス製造と同等の精密公差に達するまで研削と研磨を施すことが可能である。米エキゾチック・エレクトロオプティクス社(Exotic Electro-Optics)の研究チームは従来の研削および研磨技術を使ったスピネルレンズの製造工程を記録した。彼らは目視検査、表面粗さ、粒径、透過率、強度、屈折率、コーティング

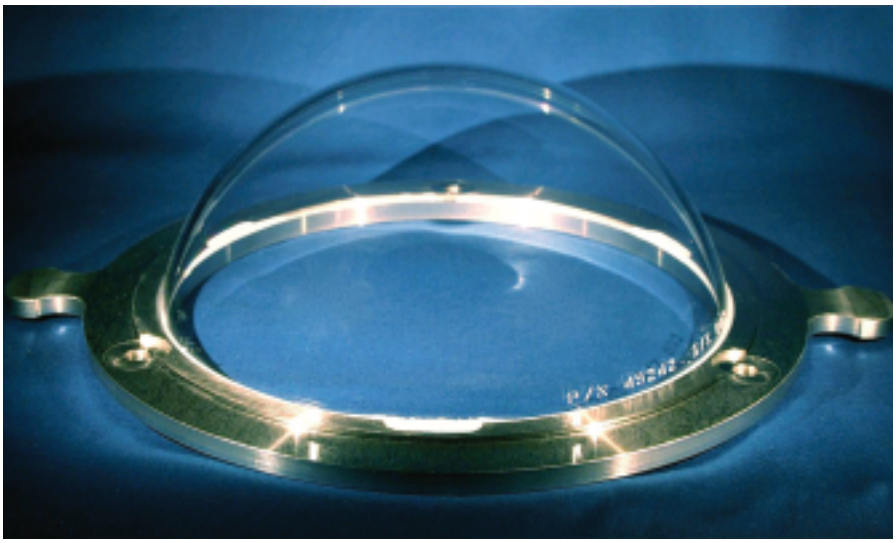

図2　OptiDomeは大きく湾曲した面の計測学のテスト用に製造された。

特性などのデータを収集した。その結果、スピネルは典型的な光学仕様が達成されるまで研磨可能であることが明らかになった[5]。

これらの材料の加工は継続的に進化／改良され、コストもさらに削減されるであろう。米オプティプロ社（OptiPro）が開発した技術、UltraForm Finishing（UFF）は、材料に適合するスラリーを使うことによってBK7ガラスからAlONや透明PCAまでのほぼ全ての材料の研磨を可能にした。OptiPro eSX 150光学マシニングプラットフォーム上で150nmの表面2乗平均（RMS）指数まで研削されたPCA光学系は、UFFの使用によって18nmという低い表面粗さまで研磨することができた。研磨パラメータを変えることによってAlONにおいても低い表面粗さを達成できた[6]。

米オプティマックス・システムズ社（Optimax Systems）は光学セラミックの加工に要する時間を大幅に低減する加工法、いわゆるVIBEを特許化した。高周波ランダムVIBE動作は、従来の研磨に比べて除去速度が10～30倍速いため、硬質セラミック加工に非常に適している。これは、必要な正しい表面形状を維持しながら、中間空間周波数を取除く能力も持っている[7]。したがって、この加工法は研磨前工程としてのサブ表面損傷の除去と仕上げ工程としての中間空間周波数誤差の除去に役立つ。

従来のダイヤモンド旋盤IR光学に比して、VIBEプロセスは表面粗さが低く、光散乱体が少ない表面を作り出し、IRイメージングシステムにおける優れた信号対雑音（SN）比をもたらす。これは最新の高解像度検出器を使う光学系において特に重要である。

製造に関する議論では、特に光学ドーム表面のように大きく湾曲した面の場合、計測学の考察も不可欠である。薄い同心円状の球形ドームは、これまで光学ガラスまたは溶融石英を使って製造されていたが、現在は結晶性のセラミック材料を使って日常的に作製されている。ドームに対する計測学の開発を促進させるために、光学ドーム計測学の開発を進めている会社がこれらの装置の性能評価に使用するための試験アーティファクト、いわゆるOpti-Domeがオプティマックス社によって製造された（**図2**）。

コーティングの考察

マルチチャネル光学用のコーティングは大きく湾曲した面を横切る可能性がある二つ以上の離散的なスペクトル領域に適応しなければならない。今や、薄膜コーティング技術の進歩によって、これらの要求をサポートするコーティングが入手可能になった。これらのコーティングは単一の光チャネルにおける視覚システム、鍵、レーザライン、ナイトビジョンなどの利用を可能にする。この光学コーティングは、計画要求に合わせて、特定の波長、角度、偏光を修正することも可能である。

参考文献

(1) J. Allen, "Lockheed Martin's Sniper Advanced Targeting Pod Successfully Demonstrates Maverick Missile Compatibility"（2006）.
(2) E.R. Dowski, Jr. et al., "Wavefront Coding: jointly optimized optical and digital imaging systems," Proc. SPIE, 4041（2000）.
(3) M.V. Parish and M.R. Pascucci, "Polycrystalline Alumina for Aerodynamic IR Domes and Windows," Window and Dome Technol. and Mat. XI, 7302, 730205-1-730205-8, SPIE（2009）.
(4) L.M. Goldman et al., "Large Area ALON Windows for Reconnaissance and Armor Applications," Window and Dome Technol. and Mat. XI, 7302, 730206-1, SPIE（2009）.
(5) J.R. Bashe and D.L. Hibbard, "Observations during the fabrication of Spinel optics," Window and Dome Technol. and Mat. XI, 7302, 73020C-1, SPIE（2009）.
(6) S. Banbrick et al., "Recent Developments in Finishing of Deep Concave, Aspheric, and Plano Surfaces Utilizing the UltraForm 5-axes Computer Controlled System," Window and Dome Technol. and Mat. XI, 7302, 73020U-1, SPIE（2009）.
(7) J. Degroote Nelson et al., "VIBE finishing to remove mid-spatial frequency ripple," http://www.optimaxsi.com/Capabilities/Innovation.php（2010）.

著者紹介

ブランドン・ライト（Brandon Light）はオプティマックス・システムズ社の製造エンジニア。
e-mail：blight@optimaxsi.com

LFWJ