２つの卓越した赤外光学材料、ALONとスピネル

モーハン・ラミセッティ、リー・コールドマン、スリ・サストリ、
ウダイ・カシャリカール、ナジェンドラ・ナグ、スリーラム・バラスブラマニアン

ALONとスピネル（尖晶石）は、赤外（IR）オプティクスに使われる２つの透明セラミックスであり、それぞれ優れた特性の組合せを示している。２つを比較することによって工学技術者は、仕事に適した材料を選択することができる。

2つの赤外光学材料、アルミニウム酸窒化物（米サーメット社〈Surmet〉がALONという名で商品化）は、立法スピネル結晶構造、それにマグネシウムアルミネートスピネル（通常スピネルと言う）は、いくつかの価値のある優れた特徴を備えている[1]。中でも耐久性、広帯域スペクトル透明性（UVから中赤外まで）に加えて、耐薬品性、高硬度、高力価が挙げられる。

これらの材料は何十年も前からラボレベルの研究はされてきたが、市販されるようになったのはつい最近のことである（**図1**）。防衛やオプティクス産業に対する関心の高まりに後押しされて、ここ数年でこれらの材料が市場に出てきた。さらに、それらの機械的、光学的特性を組み合わせることで、その材料は多くの他の分野でも極めて魅力的になっている。

両方の材料ともガラスと同じように見えるが、ALONやスピネルの何が特別なのか。この問いには多面的に答えることになる。まず、ALONとスピネルは幅広い範囲の波長に透過性がある。つまりガラスがスチールと同様に不透明であるスペクトル領域で、それらは透明である。第2に、その優れた機械特性によって非常に優れた環境耐性が生まれ、それらはガラスと比べると耐摩耗性は10倍程度高い。また、温度耐性もガラスが耐えられるよりも遙かに高く、化学環境に対しても耐性が著しく高い。

別の透明セラミック材料、サファイア（アルミナの単結晶形）も硬く、耐性が高く、透明である。では、ALONやスピネルのサファイアとの違いは何か。透明になるためにサファイアは単結晶ブールまたはシートとして成長させられ、続いてカットして研磨し、最終コンポーネントになるには滑らかになるまで磨かなければならない。一方、ALONやスピネルは、その立方結晶構造のお陰で、多結晶形態で透明であるため、従来の粉末加工技術を用いて製造できる。

サファイアは、成長率が非常に遅い（100kgブールの成長に18日かかる）という限界もあり、複雑な形状や大きなサイズ（現状の最大サイズは約16 in.幅）を造ることができない。サファイアが高硬度（モース硬度ではダイヤモンドの次）であることを考慮に入れると、このブールから最終コンポーネントを彫り込むのは非常に時間がかかる、高価な提案になる。

一方、サファイアに近い硬度のALONとスピネルは粉末加工で製造できる。ここでは、コンポーネントの基本形、いわゆる「グリーン体」（成型体）は粉末から造られる。これには、通常使用されている技術、粉末冶金、射出成形、冷間静水圧プレスなどを用いる。

図1　サーメット社が製造したALONおよびスピネルコンポーネントの例を示している。金属グリッドを埋め込んだコンポーネントも含まれる（上段右）（資料提供：サーメット社）。

グリーン体は、チョークの堅さであり、50%程度の密度しかなく、かなりの空隙率である。グリーン体は、一般に扱いやすい強度であるが、手で壊せる程度の弱さである。さらに、一連の熱処理段階により、完全な光学密度と全強度を実現できる。その粉末加工経路により、これらの材料は大きなサイズで製造でき、単結晶サファイアでできる。少なくとも、実用的にできるよりも複雑な形状に製造できる。

ALONとスピネル光学セラミックスは、単結晶サファイアの代替品となるほど安価ではないが、大きなサイズあるいは、複雑な形状のコンポーネントを必要とするアプリケーションには、よりよいソリューションとなる。粉体加工で容易になる、もう1つの優れた特徴は、コンポーネントの中に金属構造を埋め込み、それでいて透明性を維持できることである(例えば、図1上段右端の方形タイル)。

ALONとスピネルの製造

透明多結晶セラミックスを商用生産できるメーカーは世界中に極めて少ない。例えば、サーメット社はALONコンポーネントの唯一の商用サプライヤであり、スピネル透明セラミックコンポーネントを製造し供給している数少ない世界的な企業の1社である。現在、大型のスピネルコンポーネントを量産供給する信頼できるサプライヤは存在しない。スピネルコンポーネントは、2つのアプローチのうちの1つを用いて製造される。焼結/熱間等静圧圧縮成形(HIP)とフッ化リチウム(LiF)添加熱間加工/HIP。サーメット社は古典的な固体焼結/HIPアプローチをALONとスピネルコンポーネント製造に適用している。ある研究によると、市販の焼結/HIP部品はLiF添加熱間加工/HIPベースの部品よりも優れている[4,5]。

ALONやスピネルコンポーネントの製造は、他のセラミック材料で用いられているのと同じ粉体加工技術に依存している。しかし、透明性に対する要求から、さらなる課題がいくつかある。これらには、非常に高純度(ppmレベルの不純度でも色がついたり、不透明になったりする可能性がある)の出発

表1　ALONとスピネルの主要特性[2,3]

特性	ALON	スピネル
強度(MPa)	300～700	70～300
硬度(kg/mm^2、Knoop)	1800～1870	1550～1650
屈折率(波長0.5μm)	1.80	1.723
透過は超範囲(2㎜厚)	0.25 to 6	0.25 to 6.5
均質性における屈折率(～4インチ口径、RMS)	～5	＜10
透過率(%)	84～85	80～86
曇り度(%)	＜2	＜10
透明度(%)	＞98	＞95

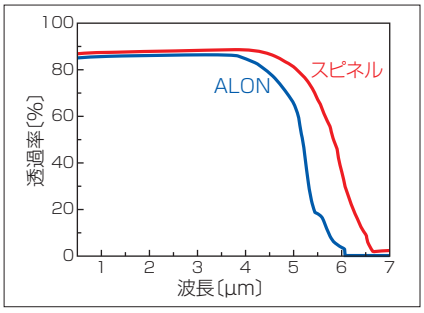

図2　ALONとスピネルの透過スペクトルの比較(2㎜厚、反射防止膜なし)

表2　ALON[3]の現在および可能性のあるアプリケーション

有用な特徴/特性	アプリケーション
強度 ・硬度 ・化学耐性 ・耐久性	透明装甲車両:ALONは、現存の最良の透明装甲車両用材料。ALONは、高度な脅威に対して、最先端の弾道性能を提供する。これには.50口径装甲車貫通弾、ガラス装甲の半分の重量と厚さが含まれる。 耐久性の高い透明製品:ALONは、最高硬度セラミック材料の1つであるので、耐傷性、環境耐性が非常に高い(雨や砂に対する耐浸食性)。レーザ通信(航空機搭載レーザデータリンク、MANPADS対抗、レーザ測距器、レーザ目標照準器、レーザレーダなど)、センサの保護カバー、圧力容器、レーザ点火ウインドウなど。 携帯用デバイスとエレクトロニクス用のカバー:ALONスクリーンは高硬度であるため、文字通り傷がつきにくい。
中赤外透過率 高い屈折率均一性 低い透過波面誤差	赤外オプティクス:3モード探査装置および上方半球カバーは、赤外ミサイルや反撃システムに用いられている。 偵察ウインドウとセンサウインドウ:ヘリコプターと航空機で、大型ALONウインドウが利用できる。優れた屈折率均一性、透過波面均一性であるため。 暗視装置システム:ALONベースの透明装甲システムは、0.6～1μmの波長範囲(一般的な暗視装置の動作波長)で透過性が高いため、ガラスベースの装甲に対して大きな優位性がある。
RF透明性	ハイパワーRF加速器のウインドウ
埋め込み構造	多機能性:透明装甲ウインドウに埋め込まれたセンサやアンテナ、電磁遮蔽、付加的弾道パフォーマンス、流体通路用多孔チャネルなど。
化学およびプラズマ耐性	半導体装置、プラズマ・エッチングチャンバなど。

図3 ALON透明セラミックコンポーネントとアプリケーション例（上段列：透明装甲車両；中央：センサと偵察ウインドウ；下段：ミサイルおよび反撃用中赤外オプティクス）。（資料提供：左欄：サーメット社。中央：ジョー・バリンガー氏、米国海軍（上）；米国空軍写真／マット・ヘクト氏（中央）；ジュリアンヌ・ショーウォルタ氏、米国空軍（下）；右：ベンクト・オーバーガー氏（上）；ブライアン・フレスケ氏、米国海軍（中央）；Looper 5920（下）。中央と右欄はウィキメディア・コモンズ）

粉末を製造するための粉体合成の制御および、0.1％以下まで空隙率を減らすという要求が含まれる。さらに、透明セラミックコンポーネントは透明性を達成するために研磨し、磨いて滑らかにしなければならない。この全てが、複雑な形状のコンポーネントには一段と厳しい課題となる。

主要特性とアプリケーション

ALONおよびスピネル光学セラミックスの主要特性の一部は**表1**に示した。見られるように、ALONは優れた機械特性を持っている。市販のALON製品は、光学品質で知られている。これには、くもりがなく、透明度が高く、屈折率均一性、それに含有物がないことも含まれる。一方、LiF添加熱間加工/HIPアプローチで製造されるスピネルコンポーネントは強い曇り度を持つことが知られている。

図2に見られるように、中赤外オプティクスやセンサアプリケーションで必要とされているため、スピネルはスペクトル透過性を中赤外波長まで広げた。しかし、大きなサイズでスピネルが直ぐに利用できないような場合には、ALONを利用することが可能であり、生産可能な代替品として考えられている。ALONは、優れた機械特性と製造可能性の組合せにより、より広い範囲のアプリケーション向けに考慮されている。ALONコンポーネントのアプリケーション例は**表2**および**図3**に示している。

これらの材料は、重要な防衛要求を満たすために量産されるので、製造コストは下がる。量産とコスト低下の組合せにより、これらの材料は幅広い範囲の、よりコストを重視するアプリケーションに適用できるようになる。これには、半導体加工装置、携帯用電子機器向けの耐久性の高いカバーやウインドウが含まれる。

参考文献

(1) M. Ramisetty, et al., "Transparent polycrystalline cubic spinels protect and defend," Am. Ceram. Soc. Bull. 92, 2, 20-24 (2013).

(2) D.C. Harris, "Durable 3-5 μm transmitting infrared window materials," Infrared Phys. Technol. 39, 185-201 (1998).

(3) L.M. Goldman, et al., "ALON optical ceramic transparencies for window, dome and transparent armor applications," Proc. SPIE 8016, 801608 (2011).

(4) J.J. Swab, et al., "Determining the strength of coarse-grained AlON and spinel," J. Am. Ceram. Soc. 97, 2, 592-600 (2014).

(5) M. Rubat du Merac, et al., "Effect of Impurities and LiF additive in hot-pressed transparent magnesium aluminate spinel," Int. J. Appl. Ceram. Technol. 10, E33-E48 (2012); doi: 10.1111/j.1744-7402.2012.02828.x (2012).

著者紹介

モーハン・ラミセッティ、リー・コールドマン、ウダイ・カシャリカール、ナジェンドラ・ナグ、スリーラム・バラスブラマニアンは、サーメット社（Surmet）先端材料開発チーム所属、スリ・サストリはサーメット社の創始者/CEO/会長。

e-mail: mramisetty@surmet.com　URL: www.surmet.com.

LFWJ