

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

宇宙望遠鏡向けミラーへのコーディエライトセラミックスの 適用性検討

Investigation of applicability of cordierite ceramics to mirrors
for space telescopes

河野 太郎, 北本 和也, 上野 遥, 草部 将吾, 水谷 忠均

KAWANO Taro, KITAMOTO Kazuya, UENO Haruka, KUSABE Shogo
and MIZUTANI Tadahito

2024年1月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目次

概要	1
1. はじめに	2
1.1. 背景	2
1.2. 研究開発の経緯	3
1.3. 本資料の構成	3
2. コーディエライトセラミックスの特性評価	6
2.1. 物性値評価	6
2.2. 研磨性評価	8
2.2.1. 素材の特性確認・平面ディスク研磨例	8
2.2.2. 凹面放物面鏡のコンピューター制御研磨例	10
2.3. 接着性評価（支持構造との接合）	13
3. 試作検討・製造性確認結果	17
3.1. 試作，製造性検討活動概要	17
3.2. 軽量化加工検討	18
3.3. 軽量化ミラーの試作	22
3.3.1. 0.3m 級軽量化加工非球面ミラー	23
3.3.2. 0.7m 級軽量化加工球面ミラー	26
3.3.3. 1.3m 級軽量化加工ミラー	33
4. コーディエライトセラミックスの優位性についての考察	35
4.1. ミラー形状および解析モデル	35
4.2. 固有値解析	38
4.3. 静荷重解析による変形評価	41
4.4. 静荷重解析による強度評価	47
4.5. 熱変形解析結果	48
4.6. まとめと考察	57
5. まとめ	58
謝辞	59
参考文献	60
付録	62

宇宙望遠鏡向けミラーへの コーディエライトセラミックスの適用性検討

河野 太郎^{*1}, 北本 和也^{*1}, 上野 遥^{*2}, 草部 将吾^{*1}, 水谷 忠均^{*1}

Investigation of applicability of cordierite ceramics to mirrors for space telescopes

KAWANO Taro^{*1}, KITAMOTO Kazuya^{*1}, UENO Haruka^{*2}, KUSABE Shogo^{*1}, MIZUTANI Tadahito^{*1}

ABSTRACT

This paper summarizes the results of an investigation into the characteristics of cordierite ceramics as a mirror substrate. For this study, the material properties of cordierite ceramics were obtained based on various standards. As a result, cordierite ceramics was found to be superior to glass ceramics in terms of specific stiffness, bending strength, and thermal conductivity. The coefficient of thermal expansion (CTE) indicates a particularly low value near the zero-crossing point at room temperature. Radiation resistance has also been experimentally confirmed. In addition, to assess manufacturability, three mirrors, each was 0.3, 0.7, and 1.3 meters in diameter, were prototyped and verified to be suitable for use as mirrors for visible wavelength. Based on these results, it was revealed that cordierite ceramics have sufficient properties as a mirror substrate for space telescopes and are suitable for lightweight large-diameter mirrors.

Keywords: mirror substrate, space telescope, cordierite ceramics, ceramics mirror

概 要

本稿はコーディエライトセラミックスをミラー母材に適用した場合の特徴について検討した結果を包括的にまとめたものである。本研究の中で各種試験規格に従いコーディエライトセラミックスの材料特性を改めて取得した結果によると、コーディエライトセラミックスは特に比剛性や強度、熱伝導度の観点で従来のガラスセラミックスより優れた結果が得られている。線膨張係数については温度依存性を含めて詳細な特性を取得し、特に室温近辺にて低い値となる結果を得た。また、放射線についても十分な耐性があることを試験的に確認した。製造性については、0.3m級、0.7m級、1.3m級のミラー母材を試作し、可視ミラーとして問題なく使用できることが検証された。これらの結果から、コーディエライトセラミックスは宇宙用望遠鏡のミラー母材として必要な特性を有し、特に軽量大口径の大型ミラーの実現に適しているといえる。

* 2023年10月12日受付 (Received October 12, 2023)

^{*1} 研究開発部門 第二研究ユニット (Research Unit II, Research and Development Directorate)

^{*2} 国際宇宙探査センター 宇宙探査システム技術ユニット (Space Exploration System Technology Unit, JAXA Space Exploration Center)

1. はじめに

本資料は、宇宙航空研究開発機構（JAXA）研究開発部門が実施したコーディエライトセラミックスによる宇宙望遠鏡向けミラーの製造性に関連する研究開発について、これまで個別に発表されてきた成果をまとめたものである。

1.1. 背景

一般に望遠鏡はより大きな口径を持つほど、より遠方の細かい2点を分解することが可能となる。望遠鏡の角度分解能 α については大まかに以下の式で表される。

$$\alpha = \frac{1.22\lambda}{w}$$

ここで λ は観測波長、 w は対象とする望遠鏡の口径を示す。従って望遠鏡の性能を向上させるためには物理現象として原理的により大きな口径の望遠鏡が必要となる。当然、口径が大きくなったとしてもミラー面の形状精度は観測波長に対して十分なものでなければならない。従って相対的に十分な形状精度を実現する難易度はミラー口径が大きくなるほど増すことになる。

大型で高い形状精度を単一材料によるモノリシックな構造体により実現する場合、自重による変形の影響を少なくするために使用材料は比剛性が高いものであることが重要である。また、温度変動に対して形状を安定させるためには線膨張係数は極力低く、全体で温度を均質化させるために熱伝導率はより高いことが望ましい。加えて宇宙望遠鏡の素材としては真空環境や放射線環境への耐性、軽量化と両立してロケットの打ち上げ環境に対応できるだけの比強度、観測波長に対して十分な精度の表面粗さを実現できる研磨への適応性なども求められる。また、これに加えて対象とする光の波長域によっては固有の特性が求められる場合もある。例えば赤外域の場合、物質の熱による輻射が観測に対してノイズとなるため望遠鏡そのものを極低温まで冷却する必要があり、その温度環境下においても形状安定性に係る各種特性が良いことが求められる。

従来、可視域での宇宙用望遠鏡の素材としては室温近辺での線膨張係数がきわめて低く、研磨により高い面精度が実現可能な低熱膨張ガラスセラミックスがよく使用されてきた。一方で低熱膨張ガラスセラミックスは素材としての強度や剛性はそれほど高くなく、望遠鏡の口径が大きくなるにしたがって望遠鏡の質量が大幅に増加する傾向にある。そこでJAXA研究開発部門では同じく室温できわめて低い線膨張係数を持つセラミックスであるコーディエライトセラミックスに着目し、材料パラメータ、機械環境耐性、放射線耐性、製造性などの観点から宇宙望遠鏡への適用に向けた調査および研究を進めてきた。コーディエライトセラミックスは特に強度や比剛性の観点で低熱膨張ガラスセラミックス系の材料に対してより優れた特性を示すことが明らかとなっており、軽量高剛性かつ高精度な次世代の宇宙用大口径望遠鏡に向けた素材として高い可能性を持つ。

新規材料を宇宙用望遠鏡の素材として実際に適用するためには設計に使用するための信頼性のある材料特性値や、耐放射線性、加工性や製造性など必要なデータや確認されるべきことが数多くある。本資料は、コーディエライトセラミックスの宇宙用望遠鏡への本格的な適用を目指して実施した望遠鏡母材としての特性評価、実際の試作を通して確認した軽量化加工や大型ミラー製造の見通し等、一連の研究成果をまとめたものである。

1.2. 研究開発の経緯

JAXA 研究開発部門では 2010 年代中盤から、次世代の超高安定構造の変形計測に必要な安定した測定環境の実現に向けて研究を行ってきた。これらの活動の中では、外気や建屋空調の変動の影響を受けない高安定測定環境の整備や、測定機器の高精度化など様々な成果が得られ発表されている²⁾。その中には低熱膨張除振台の試作も含まれる(図 1-1)。

この除振台は剛性と低熱膨張性、低湿度感度など長期の形状安定性に優れた性質をもち、大型形状の整形も可能なコーディエライトセラミックス NEXCERA™ (黒崎播磨)を定盤の基準面に用いて懸垂型の除振台を構成したものである。この試作の結果、コーディエライトセラミックス製の除振台はその計測面の形状安定性から治具の熱変形の影響を排除した、極めて精度の高い計測ができることが確認された³⁾。また、試作された定盤に対しては共振周波数やモードを特定するハンマリング試験なども行い、定盤が解析通りの質量特性や剛性を持つことも検証されている³⁾。

この定盤には測定系や供試体を固定するための M6 のネジ穴をもつブッシュが等間隔に埋め込まれている。また、定盤の裏面には軽量化のためのリブ加工が施されている。定盤面のブッシュのパターンおよび背面のリブパターンを図 1-2、図 1-3 の写真に示す。この定盤の大きさは 1800mm×1800mm である。ただし、製造性の観点から 1800mm×600mm の部分パネル 6 枚を井桁状に組み合わせて 1 枚板の定盤とした(図 1-4、図 1-5)。

こうしたブッシュの埋め込みやリブによる軽量化加工を含む 2m 級の大型コーディエライトセラミックス定盤の試作検証により、単に大型の低熱膨張定盤の製造能力だけでなく、大型のコーディエライトセラミックス構造のハンドリングや製造に関わる全般についても一定のノウハウや目途を得た。これらの製造ノウハウは宇宙用のミラー母材の加工にも共通して必要なものであり、先に述べたコーディエライトセラミックスの優れた機械的特性や形状安定性を鑑みると、コーディエライトセラミックスが軌道上でのミラー母材として極めて有望な材料となることが期待された。一方で可視光の望遠鏡用ミラーとして必要な形状精度は今回の計測定盤よりもさらに高いものであり、加工技術の観点での実現性に対しては追加検証が必要となった。また、宇宙用望遠鏡のミラーとして使用するためには打ち上げ環境や軌道上環境に対する耐性についてもより詳細な検証が必要となった。

以降に示す宇宙望遠鏡向けミラーへのコーディエライトセラミックスの適用性に関する一連の研究は、以上のような経緯を踏まえて開始されたものである。

1.3. 本資料の構成

本資料では、始めに 1 章 (本章) にて目的や背景を示し、2 章でコーディエライトセラミックスの特性を評価した結果を示す。この中では材料物性の詳細な評価に加え、研磨特性の評価、支持構造への接合を想定した接着特性の評価も実施した。3 章では軽量化ミラーの試作結果を示す。軽量化加工の製造検討、0.3m 級非球面鏡、0.7m 級六角形鏡、1.3m 級六角形鏡の試作評価を行った。4 章ではコーディエライト製ミラーの優位性について熱構造観点からの考察を行った。ここでは固有値解析、強度解析、静荷重および熱荷重による変形解析を実施している。最後に 5 章にまとめを示す。また、材料物性評価の過程において明らかになった、曲げ強度や線膨張係数、放射線耐性などに関する詳細事項については、末尾に付録として添付する。

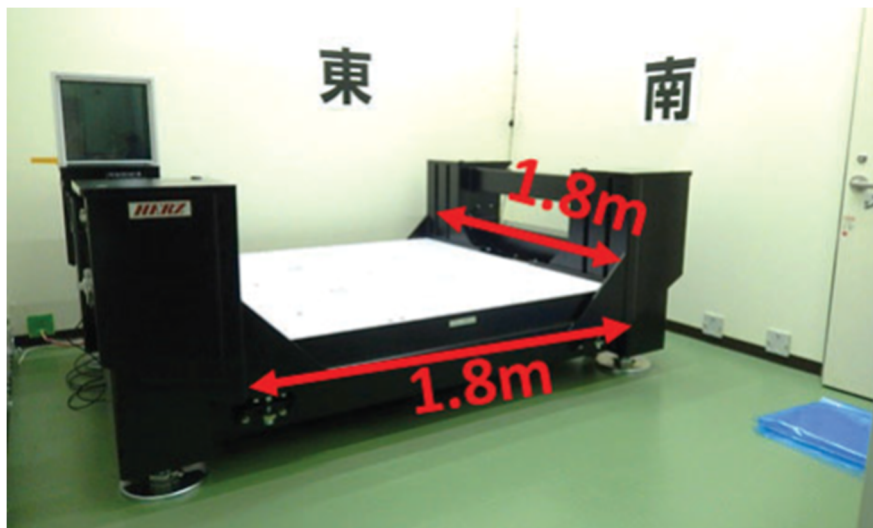


図 1-1 コーディエライトセラミックス製の低熱膨張定盤を持つ除振台²⁾

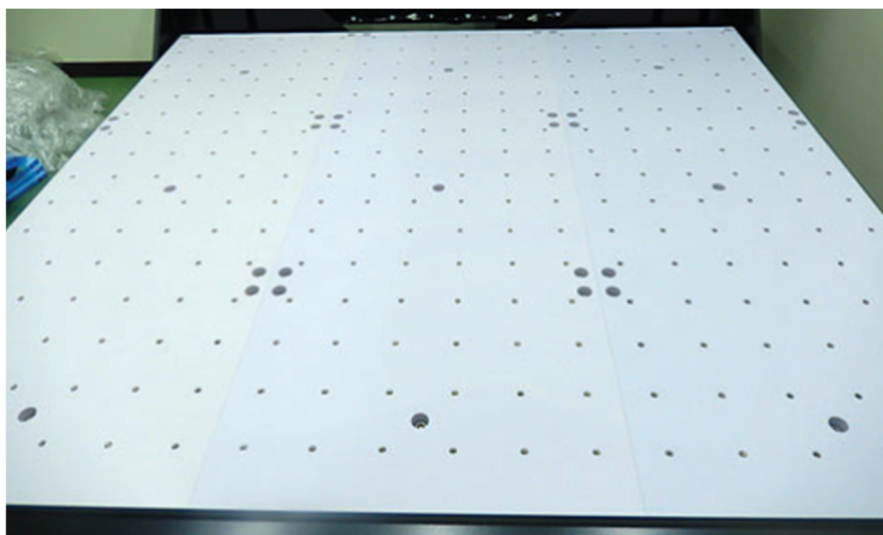


図 1-2 コーディエライトセラミックス製低熱膨張定盤の表面²⁾



図 1-3 コーディエライトセラミックス製低熱膨張定盤の裏面²⁾

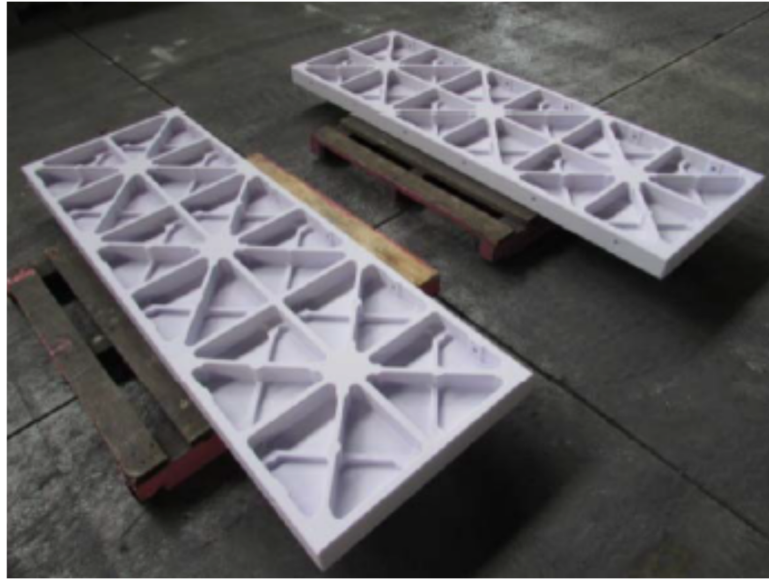


図 1-4 焼結後の部分パネル³⁾

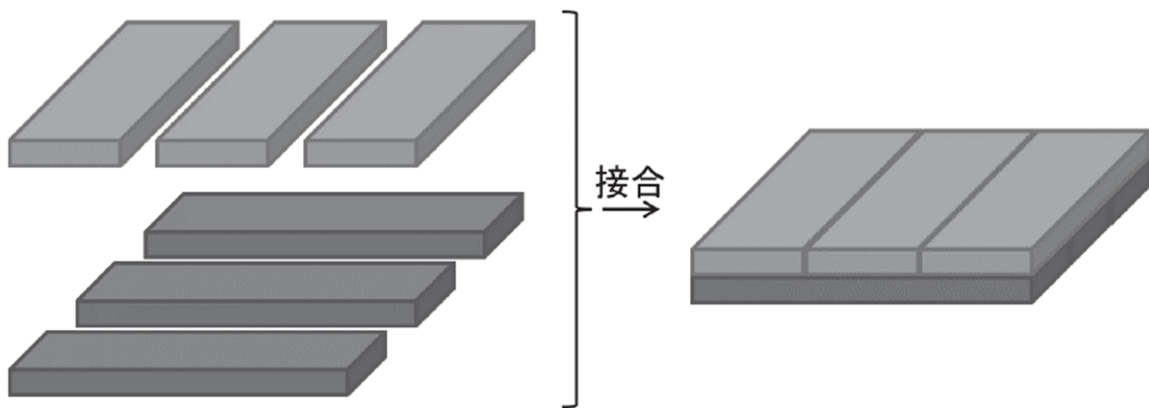


図 1-5 部分パネル 6 枚を組み合わせた大型定盤の構成図³⁾

2. コーディエライトセラミックスの特性評価

2.1. 物性値評価

コーディエライトセラミックス 2 種(NEXCERA™ CD107, 黒崎播磨), (CO720, 京セラ)の物性値について同一試験者が同一手法で評価した。また, 宇宙用望遠鏡の母材として一般的に使用される材料との比較を示すため, ガラスセラミックス材料 1 種(ZERODUR® Class 0, Schott)についても併せて評価した。評価項目は弾性率, ポアソン比, 質量密度, 気孔率, 曲げ強度, 破壊靱性, 線膨張係数, 熱伝導率である。計測および評価における特記事項を表 2-1 に, 評価結果のサマリを表 2-2 にそれぞれ示す。なお, ここで示す計測値や計測結果については, その値や結果を保証するものではない。特に値を出した条件については注意深く確認いただきたい。

また, これらの物性値評価に伴い, 特に曲げ強度, 線膨張係数および放射線耐性について従来にない多くの知見を得ている。これら各特性に関わる詳細は別途付録にまとめて示す。

表 2-1 物性値評価における特記事項

弾性率	計測は超音波パルスエコー法によって実施した。一部の計測値については, 計測者からの報告に基づき JAXA 側で誤差補正を実施している。また, 計測は室温にて実施している。
ポアソン比	一部の計測値については, 計測者からの報告に基づき JAXA 側で誤差補正を実施している。また, 計測は室温にて実施している。
質量密度	室温環境での計測である。
気孔率	計測は室温にて実施している。
曲げ強度	表中に示されているのは各研磨状態の供試体の試験結果から推定したりング曲げサンプル相当の荷重面積において 2 母数ワイブル分布において破壊確率 0.1%となる値である。脆性材は荷重を受ける面積により破壊応力が変わるため, 設計値としての使用にあたっては荷重面積を考慮のこと。その他, 曲げ強度に関わる詳細については付録に示す。計測は室温にて実施している。
破壊靱性	モード I (開口型)の破壊靱性値を取得。計測は室温にて実施。
線膨張係数	表 2-2 に示す数値は基準温度から最大, 最小温度までの変形量を温度幅で割った値 (平均線膨張係数) である。なお, BOL は放射線照射前, EOL は静止軌道 15 年相当の電子線を照射後の値である。ただし, 加速試験のため照射時の線量率などが実環境とは異なる点に注意を要する。
熱伝導率	比熱容量と熱拡散率 (JIS R 1611) の計測結果より算出された値である。

表 2-2 コーディエライトセラミックスの特性一覧 (4),(5)

項目	単位	規格	計測者	コーディエライトセラミックス		ガラスセラミックス
				CD107	CO720	
弾性率	GPa	JIS R 1602 準拠	(一財)フアインセラミックスセンター	143	142	ZERODUR
ポアソン比		JIS R 1602 準拠	(一財)フアインセラミックスセンター	0.31	0.31	0.24
質量密度	g/cm ³	JIS R 1634	(一財)フアインセラミックスセンター	2.58	2.55	2.54
気孔率	%	JIS R 1634	(一財)フアインセラミックスセンター	0.0	0.0	0.0
曲げ強度 (焼き肌)	MPa	ISO EN 1288-5	(国研) 宇宙航空研究開発機構	48	63	N/A
曲げ強度 (精研剖面)	MPa	ISO EN 1288-5	(国研) 宇宙航空研究開発機構	102	65	41
曲げ強度 (研磨面)	MPa	ISO EN 1288-5	(国研) 宇宙航空研究開発機構	100	141	24
破壊靱性 (モード I)		JIS R 1607	(一財)フアインセラミックスセンター	1.5	1.4	0.8
平均線膨張係数 (25-30°C)	10 ⁻⁶ /K	JIS R 3251 準拠	アドバンス理工 (株)	0.08(BOL)	0.07(BOL)	0.04(BOL)
平均線膨張係数 (20-25°C)	10 ⁻⁶ /K	JIS R 3251 準拠	アドバンス理工 (株)	0.07(EOL)	0.06(EOL)	0.12(EOL)
熱伝導率	W/(m・K)	JIS R 1611	(一財)フアインセラミックスセンター	4.68	4.68	1.52
比熱	kJ/(kg・K)	JIS R 1611	(一財)フアインセラミックスセンター	0.752	0.775	0.780

*誤差補正等の修正に関わる最新の検討結果を反映しているため、参考文献(4)とは若干値が異なっている

2.2. 研磨性評価

ミラーの母材として適用するためには、精度良く所定の形状に研磨することができるか、表面粗さをどこまで小さくすることができるかが重要である。ここではコーディエライトセラミックスのうち、NEXCERA の研磨性について評価した結果を示す^{6),7)}。

2.2.1. 素材の特性確認・平面ディスク研磨例

まず平面ディスクを研磨し素材の研磨特性を確認した。素材はNEXCERA N117B, CD107を対象とし、120×120×20mm の板から切り出したφ50mm、厚み10mmのディスク表面を研磨した。このディスクを初めに平面研削盤を用いて表面を平面度1μm以下とした。その後単結晶シリコンやダイヤモンド砥粒を用いてラッピングし、最後にピッチ盤にていくつかのサイズのダイヤモンド砥粒とセリア砥粒を用いて研磨を行った。

N117Bの研磨後の表面状態をZygo社のNewViewにより計測した結果を図2-1、CD107の研磨後の状態を計測した結果を図2-2に示す。N117Bについては表面粗さがRMS 0.51nmまで研磨されており、CD107についてはRMS 0.34nmまで研磨することができる。NEXCERAにはセリアのような酸化物砥粒による化学的機械研磨も使用することができるが、あまり過剰な化学的機械研磨は掘り込みやスパイクを生じるため注意が必要である。

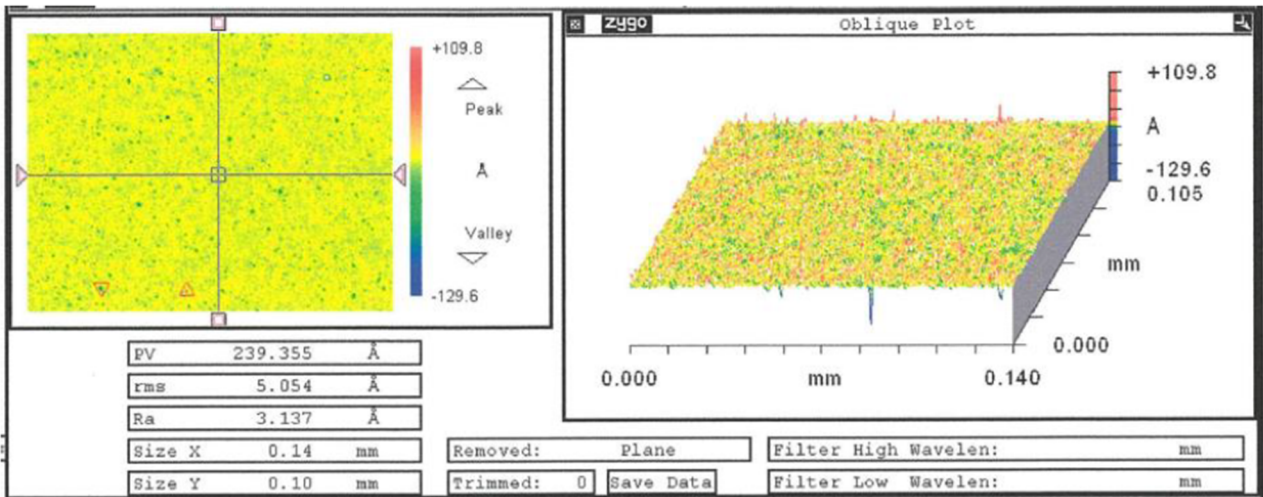


図 2-1 N117B の研磨後表面粗さ計測結果⁶⁾
(Ra 0.31nm, RMS 0.51nm)

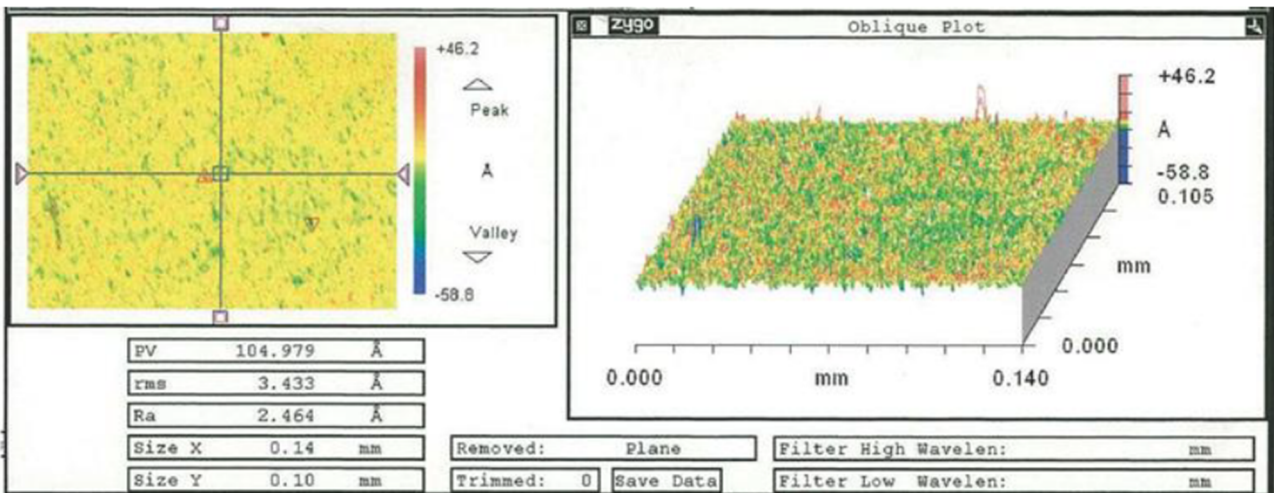


図 2-2 CD107 の研磨後表面粗さ計測結果⁶⁾
(Ra 0.25nm, RMS 0.34nm)

2.2.2. 凹面放物面鏡のコンピューター制御研磨例

次に、コンピューター制御(Computer Control, CC)によって直径 250mm の凹面放物面鏡の非球面研磨を実施した例を示す。

まず凹面放物面鏡の研磨に先立って開口よりも小さな(サブアパーチャ)研磨体でのピッチ研磨をφ70mmのディスクに対して実施し、除去レートの確認などをおこなった。研磨結果を図 2-3 に示す。ダイヤモンド砥粒を用いた場合の除去レートはゼロ膨張ガラスセラミックスや溶融石英を磨いた場合と比較して 25%程低い結果となった。ただし単結晶シリコンで研磨したケースよりは早い結果が得られており、ダイヤモンド砥粒によって実用上十分な除去レートが得られることが確認された。この研磨によってディスク表面の表面粗さは RMS 0.25nm, Ra 0.19nm となった。

その後、実際に凹面放物面の研磨を試行した。素材は 350×350×35mm の CD107 のプレートを使用し、これをφ250mm, 厚さ 30mm に研削した。目標とする放物面はコーニク係数-1.0の焦点距離 500mm, 放物面の有効範囲はφ244mm, 有効開口形はφ40mm～φ230mm である。非球面加工はピッチ製のサブアパーチャ工具を用いた CC 研磨により実施された。

作業後の凹放物面鏡の外観は図 2-4 の通りである。CC 研磨後の表面は RMS 0.61nm, RA 0.46nm(図 2-5), 形状精度 PV 165nm, RMS 26 nm(図 2-6)となっており、高い精度での研磨が実現されている。

これらの試作結果から、コーディエライトセラミックス NEXCERA は若干低熱膨張ガラスセラミックスよりも難削であるが、可視波長のミラーとして使用に問題ない程度に高い精度での研磨が可能であると言える。

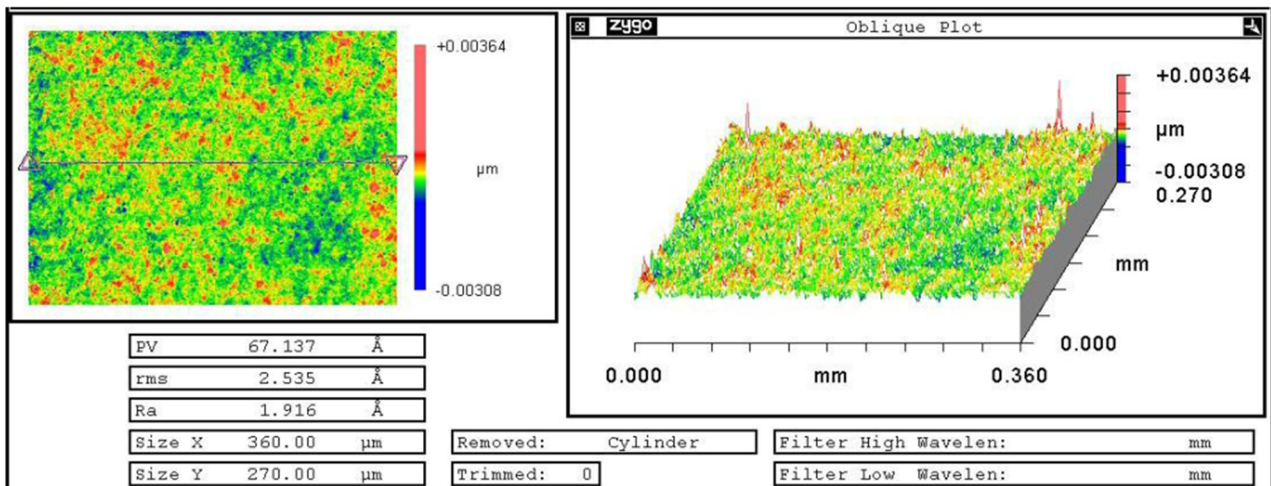


図 2-3 φ70mm 平板のコンピューター制御(Computer Control, CC)研磨結果
(RMS 0.25nm RA 0.19nm)⁶⁾

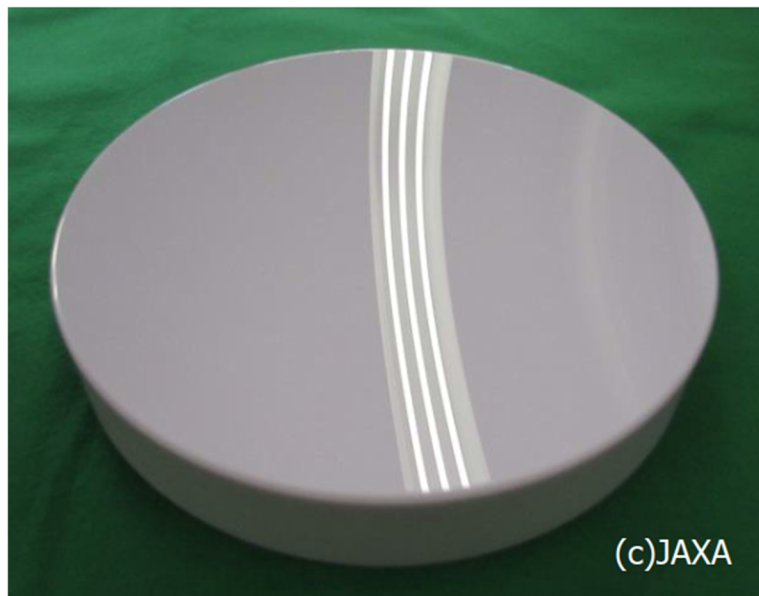


図 2-4 CD107 による凹面放物面鏡外観(外形 φ250mm, 焦点距離 500mm)⁶⁾

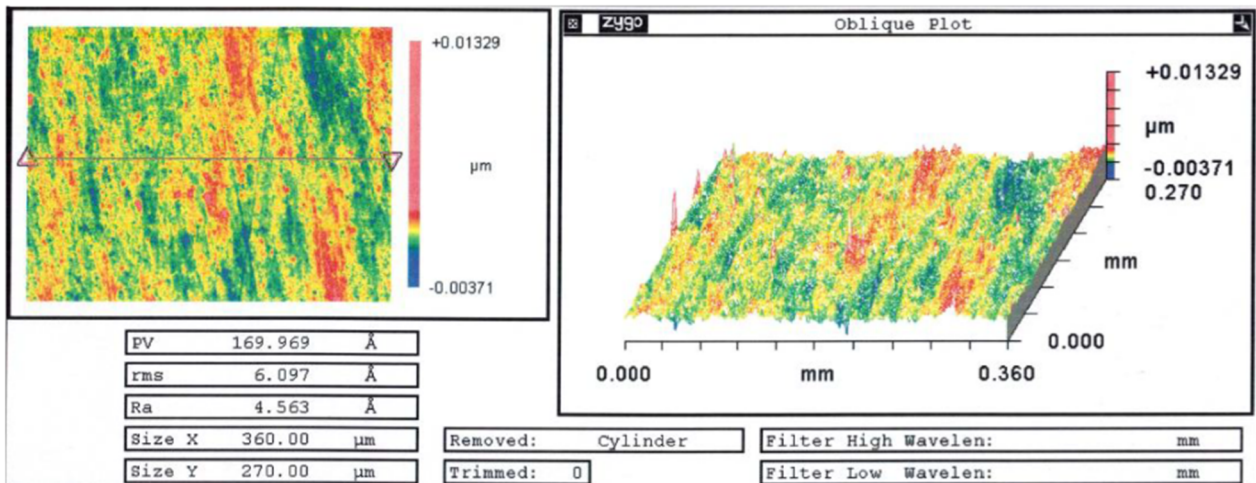


図 2-5 $\phi 250\text{mm}$ 凹面鏡の CC 研磨結果 (RMS 0.61nm RA 0.46nm)⁶⁾

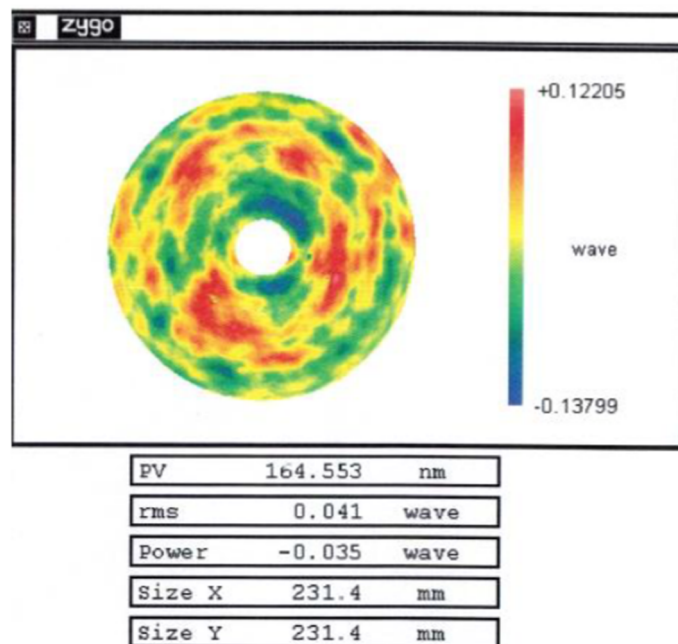


図 2-6 $\phi 250\text{mm}$ 凹面鏡 高さマップ (PV 165nm, RMS 26nm 有効径 $\phi 40\text{-}\phi 230\text{mm}$)⁶⁾

2.3. 接着性評価（支持構造との接合）

一般的に大型ミラーをその支持構造に接合する場合、ミラー裏面が接合面となることが考えられる。ミラーと支持構造の接合手段はボルト接合、接着等、いくつかの手段が考え得るが、鏡面に有害な変形を与えない接合方法を選択することが肝要である。さらに、ミラーと支持構造の構成材料は異種材料となる場合が多く、温度変化に起因する変形を抑制する設計を行う必要も生じる。コーディエライトセラミックスの適用を考える場合、材料自体に直接ネジ穴などの加工を行うことは困難であるため、パッド接着による接合が有力な候補となる。ここでは設計解の一例として、3.3.2 項で後述する 0.7m 級コーディエライトセラミックスミラーに適用した支持パッドの設計例を示す⁸⁾。

始めに 0.7m 級ミラーの背面外観を図 2-7 に示す。図に示された 6 カ所の穴がパッド取り付けを想定した接続穴である。また、この接続穴に取り付けるために設計された支持パッドの構造を図 2-8 に示す。支持パッドの素材は、ミラー母材であるコーディエライトセラミックスと同等の線膨張係数を持つ素材を選択することが重要である。もしその差の大きい素材を使用してしまうと、温度変化によって反射面の変形を生じうる。従って、パッドの材料は金属の中でも非常に線膨張係数の小さいスーパーインバー合金（IC-LTX，新報国製鉄）を選択した。メーカーの公表する IC-LTX の物性値、および著者らの研究グループで実測した物性値は表 2-3 の通りである。なお、スーパーインバー合金は低温暴露によってマルテンサイト変態を生じて低熱膨張性を失うという性質があるが、IC-LTX はマルテンサイト変態温度が低く(-100℃)抑えられており、他種のスーパーインバー合金と比較して変態温度が低い特長を有する。

線膨張係数の差が小さな素材を選択した場合でも、温度変化による反射面の変形を完全に無くすることはできない。そこで、望遠鏡に接着されるパッドの形状は接続穴に合わせて円柱としつつ、径方向に変形を可能とする放射状のスリットを加えた(図 2-9)。また、スリット下部は板バネ状の構造としストレスリリーフとしての機能を付加した。これらの工夫により、線膨張係数の差によって生じうる反射面の変形をより抑制することが可能になる。

ミラーと支持パッドを接着する接着剤の選択も重要である。接着剤は熱変形による応力の低減のため低弾性率であり、かつ実績が十分にあるものとして 2 液式の室温硬化型エポキシ系接着剤（EA9309NA AERO，Henkel）を選定した。接着厚は 0.015mm~0.020mm とした。参照した EA9309 AERO の材料物性を表 2-4 に示す。なお、これらの値は過去の製品情報等を参照した参考値であり、実測値ではないことに注意いただきたい。接着の前処理として、パッド側接着面にはアルミナ（粒径 45 μ m~53 μ m）によるグリッドブラスト処理およびエタノールによる超音波洗浄を実施した。コーディエライトセラミックス側はエタノールによる表面脱脂のみである。

以上の条件における接合強度を評価するため、ミラーの接続穴まわりインターフェース部を模擬した単体接着試験片を作成し、強度試験を行った。試験片は CD107 製の中空円筒に図 2-8 に示す支持パッドミラーを接着したものである。接着は前述した前処理を行った。中空円筒の外周部には治具を接着し試験機ベースと固定した。支持パッドは締結ボルトを介して試験機のクロスヘッドに接続している。試験機へのセットアップ状態を図 2-10 に示す。荷重は引き抜き方向にパッドに破壊が生じるまで負荷した。変位速度は 0.5mm/min とし、環境温度は室温程度である。試験には島津製作所の万能試験機 AG-150kN を使用した。

試験結果を表 2-5 に示す。破壊荷重の平均値は 19,200N、平均値からばらつき 3σ （ σ は標準偏差）を除いた値は 15,900N となり、設計荷重 5,800N を上回る強度を確認できた。破壊様相はセラミックス

の母材破壊と接着剤の破壊および接着剤の界面破壊が混在したものとなったが、これは組み立て状態の試験であるため応力状態が単純な材料試験よりも複雑となることが要因として考えられる。



図 2-7 0.7m 級軽量化コーディエライトセラミックスミラー（背面）⁸⁾

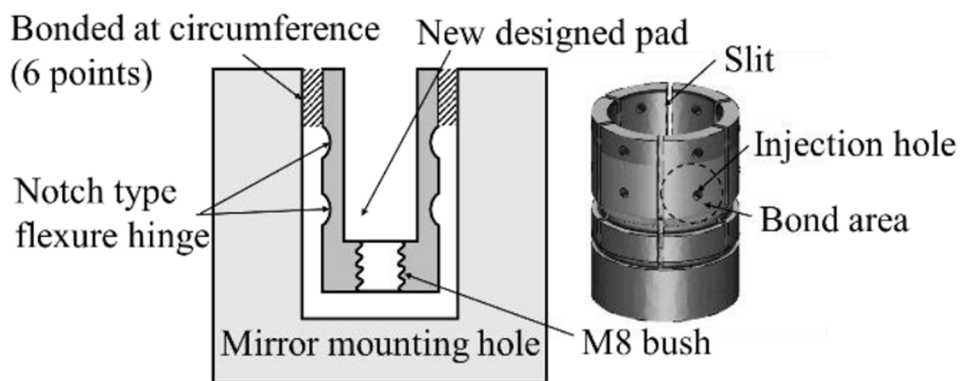


図 2-8 0.7m 級ミラーに適用したパッド形状⁸⁾

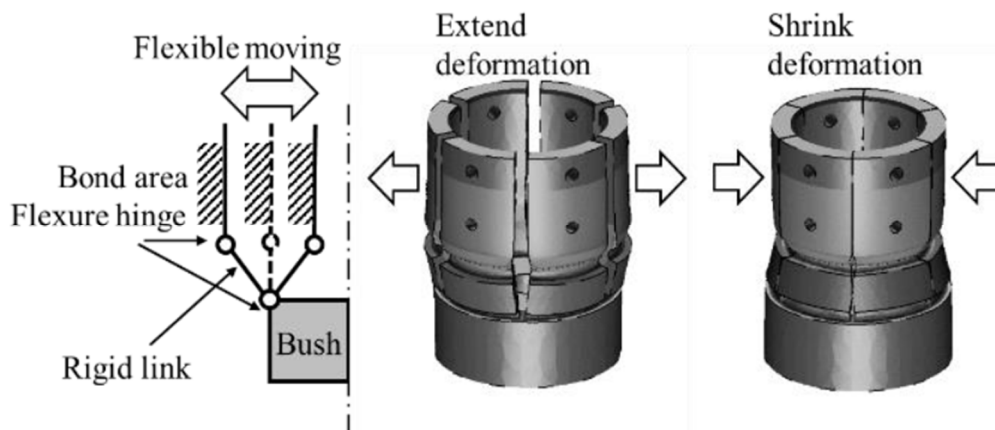


図 2-9 パッドに設けられたストレスリリーフ概要⁸⁾

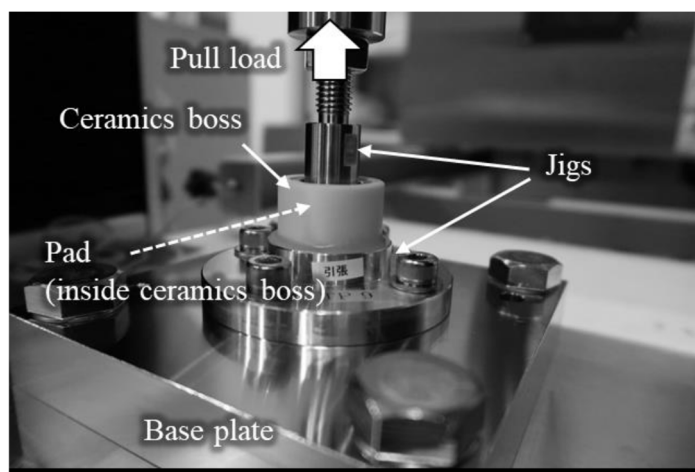


図 2-10 単体接着試験片による強度試験⁸⁾

表 2-3 IC-LTX の物性値

種類	試験実測値 (メーカー公表値 ⁹⁾)
縦弾性率 (GPa)	140 (137)
ポアソン比	0.28 (-)
密度 (kg/m ³)	8140 (8100)
熱膨張率 (ppm/K)	-0.12@23°C (±0.15@23°C)
熱伝導率 (W/mK)	14.0 (-)

表 2-4 EA9309 AERO の物性値

種類	参考値	備考
引張せん断強度 (25°C) (MPa)	42	
引張強度 (25°C) (MPa)	31	
圧縮強度 (25°C) (MPa)	48	
引張弾性率 (25°C) (MPa)	2330	低弾性
圧縮弾性率 (25°C) (MPa)	1720	低弾性
破断伸び (25°C) (%)	10	高い伸び率

表 2-5 単体接着試験片の破壊荷重と破壊様相⁸⁾

試験片 S/N	破壊荷重 (N)	設計荷重 (N)	破壊様相
1	19,600	5,800	母材破壊 (セラミックス)
2	18,000		母材破壊 (セラミックス)
3	20,100		接着

3. 試作検討・製造性確認結果

3.1. 試作，製造性検討活動概要

第3章ではコーディエライトセラミックスの宇宙望遠鏡への適用を想定した軽量化ミラーの試作結果を示す。次の3.2節では、ミラーの軽量化加工に関連する加工検討を実施し、軽量化ミラー試作の実現性を検証した結果を紹介する。ここでは、低熱膨張ガラスセラミックスと同等以上の軽量化を目論み、アスペクト比が極端に大きなリブ形状の試作に取り組んだ。続く3.3節では、0.3m級、0.7m級、1.3m級のミラー試作を行い、外形形状や寸法を変化させながら軽量化ミラーとしての製造性を確認し、製造工程の確立に取り組んだ結果を紹介する。

試作した各ミラーの概要は表3-1の通りである。

表 3-1 コーディエライトセラミックスによる軽量化ミラーの試作評価事例^{10),11)}

項目	単位	0.3m 級	0.7m 級	1.3m 級
鏡材	—	コーディエライト セラミックス	コーディエライト セラミックス	コーディエライト セラミックス
外径		円形	六角形	六角形
寸法	mm	300	700 (対角長)	1350 未満 (対角長)
面密度	kg/m ²	25 以下	40 以下	50 以下
形状精度	nm RMS	35 (非球面)	497 (球面)	63nm 未満
鏡面形状		非球面	球面	球面
支持構造 I/F		なし	あり	あり
位置調整機構		なし	なし	あり

3.2. 軽量化加工検討

軽量かつ高剛性のミラーを実現するためには材料特性が優れていることに加えて実際に狙った形状が製造可能である必要がある。そこで、コーディエライトセラミックスにより、どこまで薄い構造が意図通りに製造できるかという軽量化加工に関わる加工技術の検証を実施した^{2),12)}。また、セラミックスは製造中の熱間等方圧加圧法（Hot Isostatic Pressing, HIP）工程において拡散接合を行うことで接着剤などを介さない単一材料による接合を実現することができる。一般的な可視光学系の主鏡の構造としては、背面にリブを残して肉抜きし軽量化加工とするオープンバック構造のほかに、軽量化加工した背面にさらに蓋をするクローズドバック構造がある。このクローズドバック構造は剛性が非常に高く、地上での重力変形や、支持構造から伝搬する変形による鏡面のひずみなどを抑制することができる。HIP 工程での拡散接合により例えば図 3-1 に示すようなクローズドバック構造のミラーを実現することができれば、非常に軽量かつ高剛性なミラーがセラミックスにより実現可能となる。そこで、図 3-1 に示す赤枠を想定した部分モデル（リブ体 2 体からなる接合モデル）を作成し、リブ体の拡散接合の実現性まで含めた試作検証についても合わせて実施した。

図 3-2 に軽量化加工を行った焼成前のリブ体の写真を示す。コーディエライトセラミックスを始めとしたセラミックス材料はガラスセラミックスと異なり焼成前に最終形状に近いところまで形状加工が可能である（ニアネットシェイプ焼成）。これにより、バルクからの削り出しと比較して大幅に加工時間の短縮が可能となる。

リブ体各部の寸法は図 3-3 に示す通りである。ポケット深さは 150mm、各リブの厚さは 1.7mm、リブの辺長さは 115mm となっている。鏡面に相当する天板（図 3-3 では底面）の板厚は 2mm だが、ミラー研磨時の局所座屈（イントラセルバックリング）に対応するため、セルの内部にさらに面形状を保持する目的で、厚さ 1.3mm、高さ 8mm の補助リブが形成されている。

クローズドバック構造を製造する場合、軽量化加工を行った母材の背面に板状の蓋を接合する方式と、背面側にも軽量化加工を施し双方のリブパターンを突き合わせる方式が考えられる。前者の場合、板状の蓋の剛性が低いことから、母材背面の平面度が多少悪い場合でも板が変形することにより接合することが可能、面内方向の位置ずれにあまり影響を受けない、などの理由から製造は比較的容易である。一方で後者の方式は双方の開口面に高い平面度が必要、位置ずれの許容量も少ない、など製造の難易度は高いものの、リブ高さを双方で製造上の限界まで取ることで、最終製品としては製造上の限界の 2 倍のリブ高さとする事ができる。この試作ではより難度が高く最終的に高剛性な母材を得ることができる後者の方式で接合を試行した。焼成および研削後、拡散接合前の前部リブ体および後部リブ体を図 3-4 に示す。後部リブ体の底面に空いている穴は、HIP 接合時の空気抜きのための穴である。この二つのリブ体に対して HIP 工程での拡散接合を行ったクローズドバックミラーの部分モデルが図 3-5 である。完成したリブ体の寸法はリブ厚が 1.63mm~1.79mm、天板の板厚が 1.90mm~1.94mm であった。また、部分モデルの質量は 2.26kg の見込みに対して 2.39kg であった。

完成したクローズドバックミラーの部分モデルに対して超音波検査および X 線 CT 検査を実施した。超音波検査結果の概要を図 3-6、X 線 CT による直交断面およびリブ並行断面の検査結果を図 3-7、図 3-8 に示す。いずれの検査においても接合面に明確なずれや欠陥などは確認されなかった。

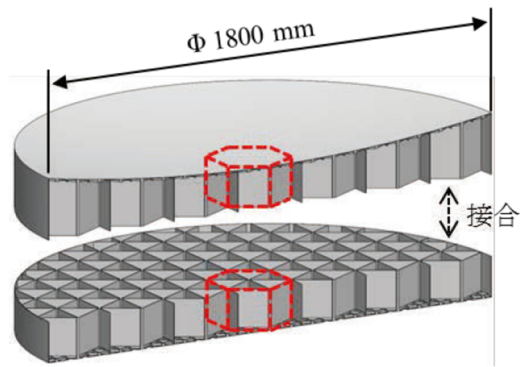


図 3-1 軽量化加工を含むミラーにおける部分試作範囲²⁾

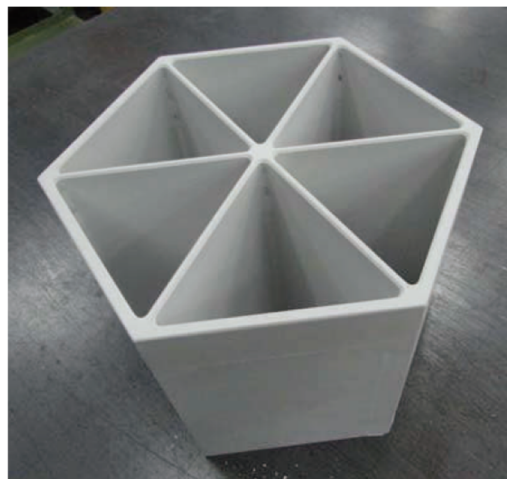


図 3-2 軽量化加工後、焼成前のリブ体²⁾

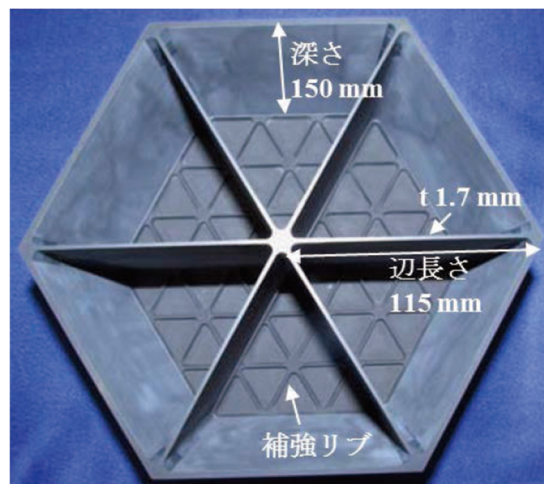


図 3-3 リブ体各部の寸法および下面補助リブ配置²⁾

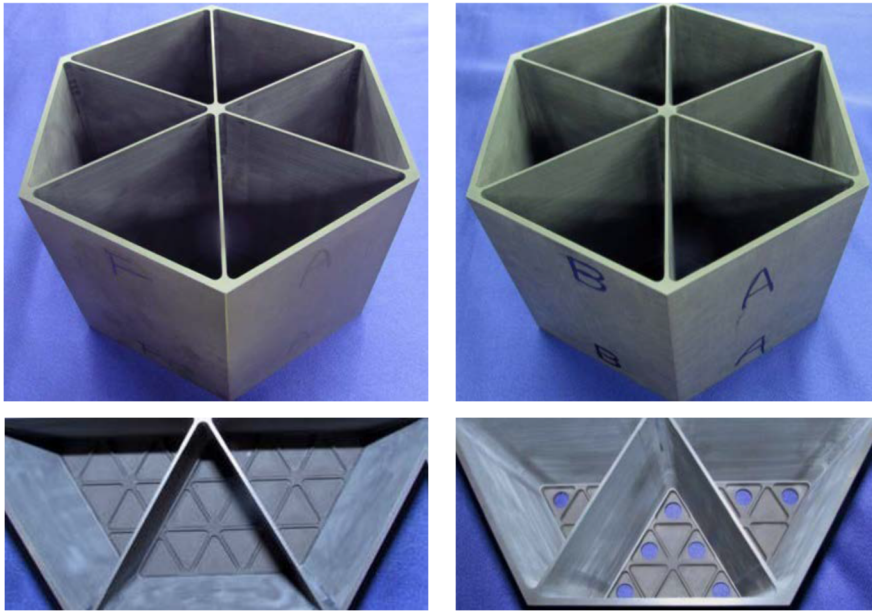


図 3-4 研削後の前面リブ体（左）および後部リブ体（右）¹²⁾

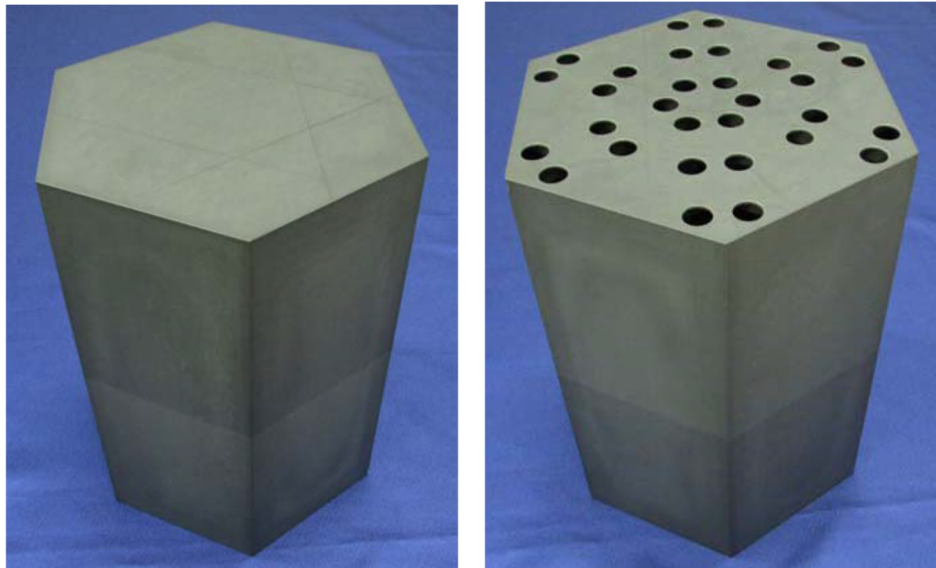


図 3-5 HIP による拡散接合後の供試体（左：front side, 右：rear side）¹²⁾

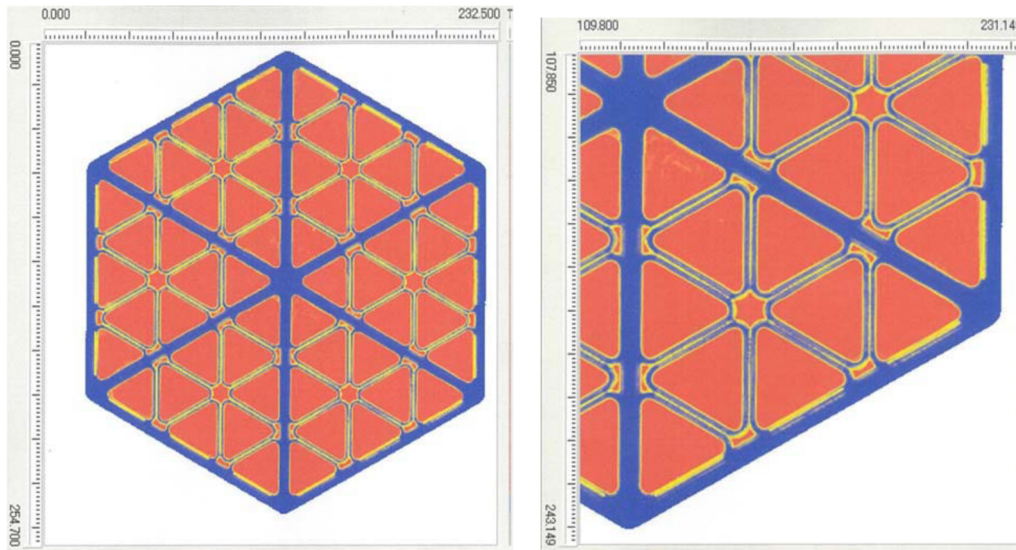


図 3-6 クローズドバックミラー部分モデルの超音波検査結果（左：全体図，右：拡大図）¹²⁾

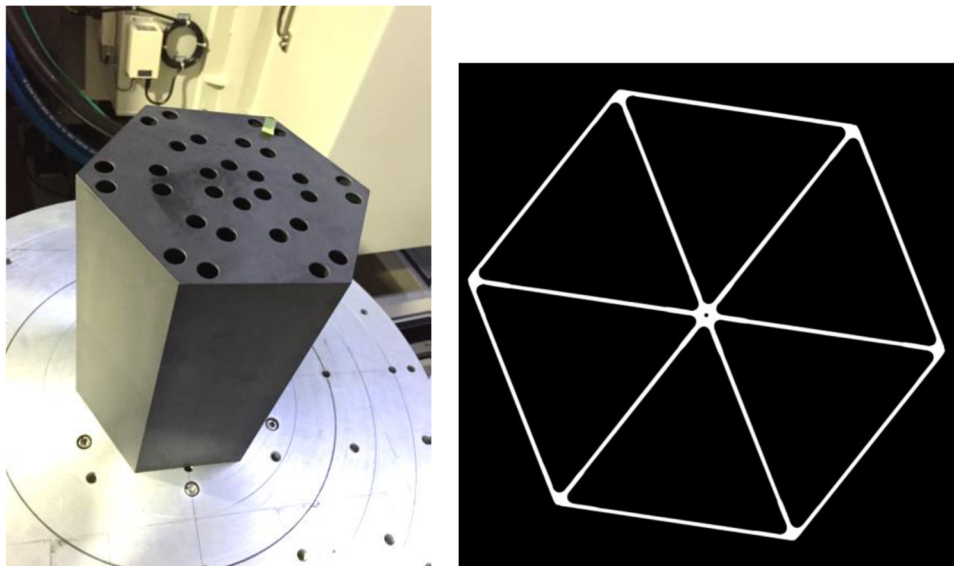


図 3-7 クローズドバック部分試作モデルの X 線 CT による接合面の透過断面図¹²⁾

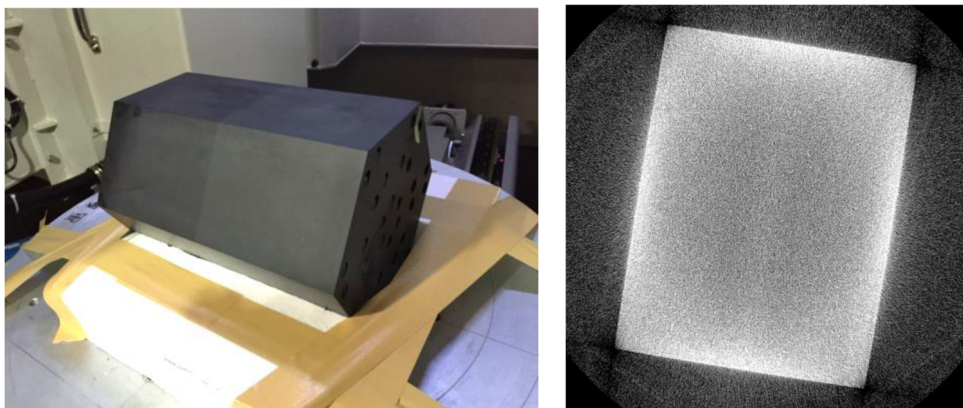


図 3-8 クローズドバック部分試作モデルの X 線 CT によるリブの垂直断面図¹²⁾

3.3. 軽量化ミラーの試作

ここまで、コーディエライトセラミックスの材料特性、表面の研磨性、耐放射線性、リブなどの製造限界や拡散接合の適用可否など素材としての個別要素について一通り検証を行った結果から、コーディエライトセラミックスが高比剛性と低 CTE の材料特性を併せ持つ、宇宙用ミラーの母材として適した素材であり、素材表面の研磨性や軽量化に必要な機械加工などにも問題がないことを示してきた。3.3 節では大型ミラーの製造性を確認するための試作事例を示す。

個別の試作事例に進む前に、著者らが検討した軽量化コーディエライトセラミックスミラーの製造手順について紹介する。製造工程の概要は図 3-9 のとおりである。コーディエライトセラミックスによる軽量化ミラーの製造においては始めに粉末状の原材料を冷間等方圧加圧法（Cold Isostatic Pressing, CIP）により加圧し、所望の形状にプレスしたブロック（グリーン体）を用意する。このグリーン体に対して最終形状に近いところまでリブ構造などの軽量化加工を行う。グリーン体はチョークほどの固さであり、焼成後のセラミックス化した状態よりは加工が容易である。コーディエライトセラミックスによるミラーはこの焼成前に軽量化加工を行うニアネットシェイプ成形により、製造時間を大幅に短縮することができる。軽量化加工後に焼成を行う。なお、焼成工程にてグリーン体は収縮を起こすが、あらかじめ焼成時の収縮を踏まえた寸法にて軽量化加工を施すことで完成品の寸法を機械加工精度程度まで調整することが可能である。焼成後にセラミックス化したミラー母材に対してさらに熱間等方圧加圧法（Hot Isostatic Pressing, HIP）による加圧を行い緻密化させる。こうして出来上がったミラー母材に対して、研削および外形加工、支持構造取り付け、精密研磨、コーティングを行うことでコーディエライトセラミックスによる宇宙用の軽量化ミラーが完成する。

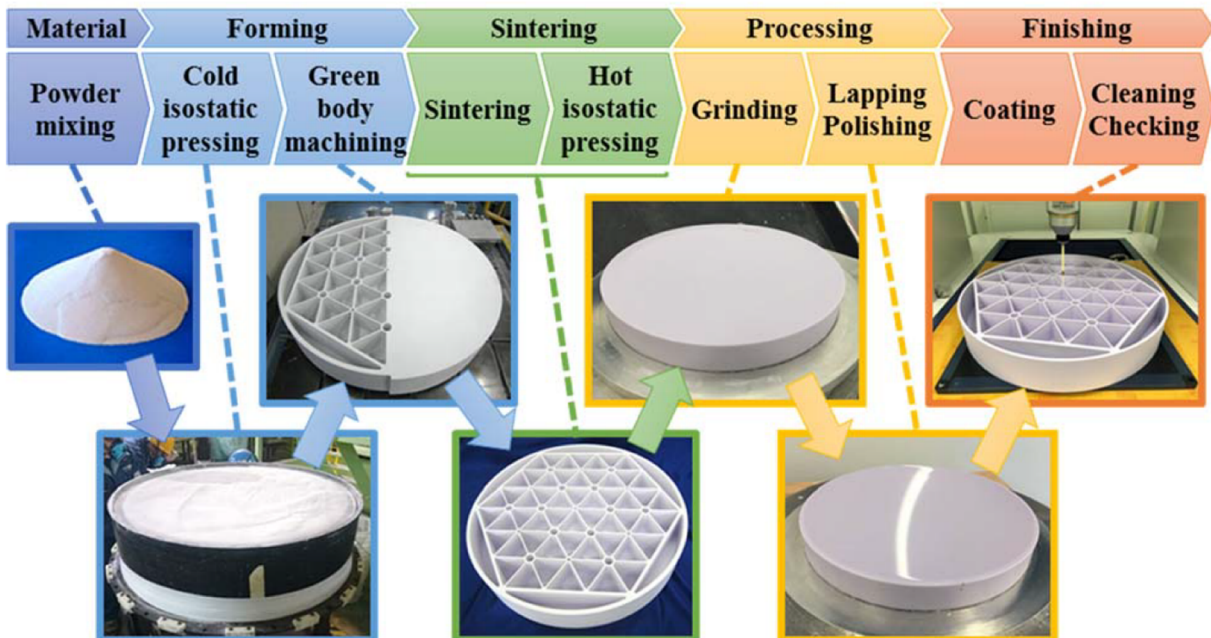


図 3-9 コーディエライトセラミックスによるミラー母材の製造工程¹³⁾

3.3.1. 0.3m 級軽量化加工非球面ミラー

コーディエライト製のミラーは小さなサイズから試作を開始した。最初に試作したミラーの直径は0.3m 級であるが、鏡面は焦点距離 500mm の非球面とし、CNC 制御による小パッド研磨を大型ミラーにも対応可能な加工機で行うなど、より大規模な実機への発展性を見据えた試作となっている。0.3m 級軽量化加工非球面ミラー（0.3m 級ミラー）の設計形状および寸法を図 3-10 に示す。

試作した 0.3m 級ミラーの外観を図 3-11 に示す。表面に背面のリブによるプリントスルーなどは見られなかった。小パッドによる非球面の精密研磨を行った後のミラー面粗さ測定結果は図 3-12 の通りである。計測を行った有効範囲内 $\phi 290\text{mm}$ の中で形状精度 35nm RMS を達成した。また、図 3-13 に示す通り測定を行った範囲での面粗さは 1nm RMS を達成しており可視光ミラーとして十分な面精度まで研磨することに成功した。

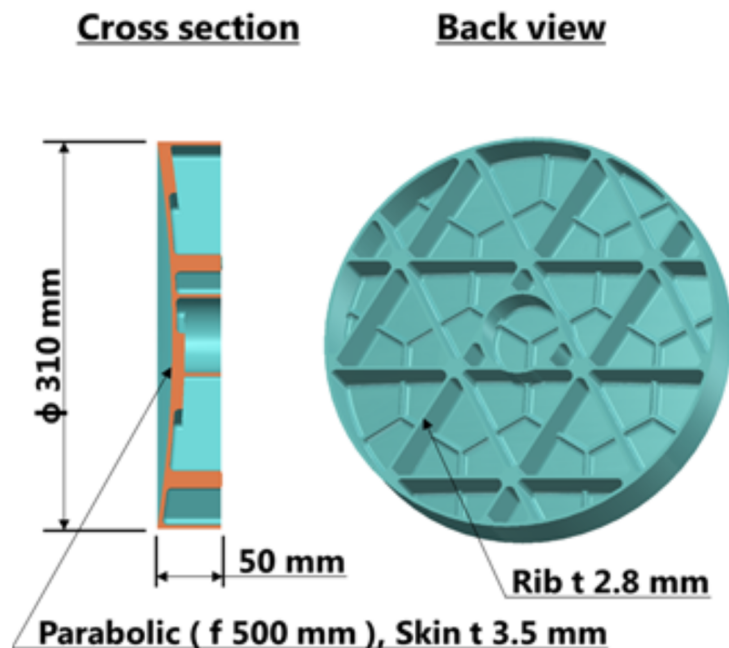


図 3-10 0.3m 級ミラーの設計形状¹⁴⁾

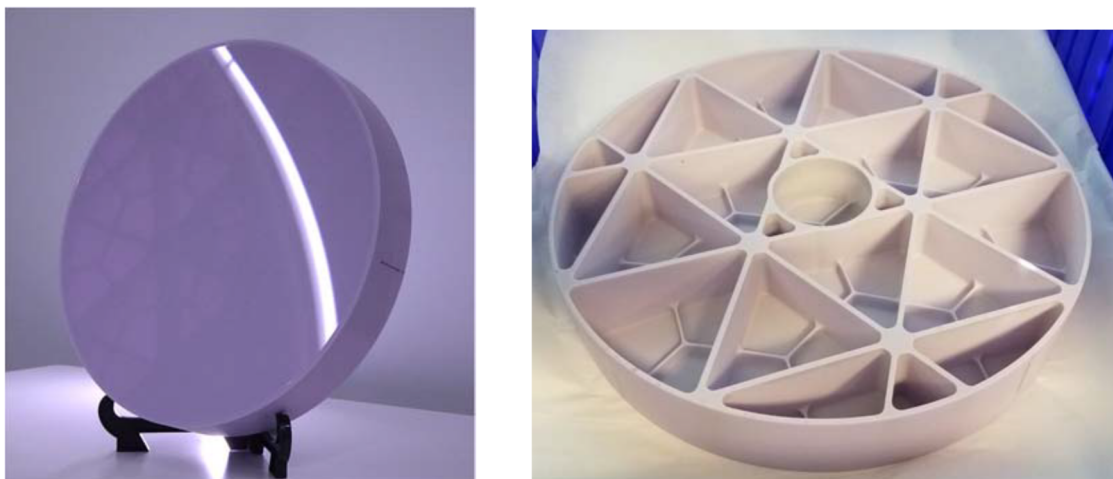


図 3-11 0.3m 級ミラーの外観および背面の軽量化加工¹⁴⁾

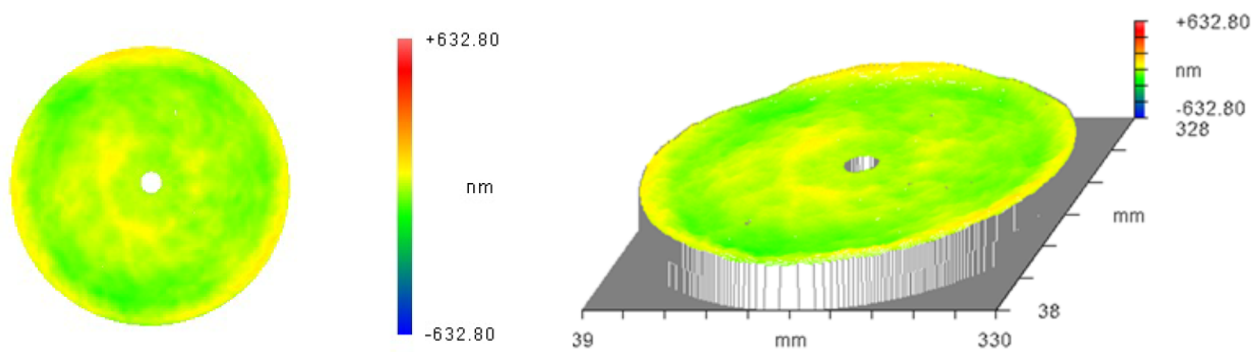


図 3-12 0.3m 級ミラーの鏡面形状測定結果¹⁵⁾

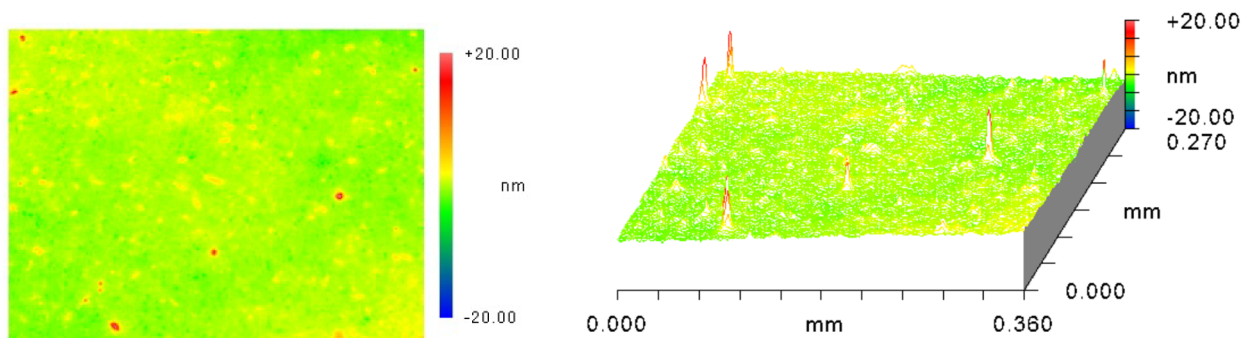


図 3-13 0.3m 級ミラーの面粗さ測定結果¹⁵⁾

表 3-2 0.3m 級ミラーの寸法 (単位 : mm)

項目	設計値
外形円直径	310±1
エッジでのリブ高さ	50±0.5
スキン厚さ	3.5±0.3
リブ厚さ	2.8±0.1

3.3.2. 0.7m 級軽量化加工球面ミラー

次に、複数ミラーの組み合わせによる光学合成開口への応用を視野に入れ、円形状以外のミラーの製造性と機械環境に対する耐性を確認した。ここでは、六角形状の 0.7m 級のミラー (0.7m 級ミラー) を試作した結果について示す。鏡面を非球面とした場合の小パッドによる精密研磨の製造性については先の 0.3m 級ミラーにて確認されているため、このミラーでは加工時間の短縮を狙い鏡面の形状を大皿研磨による曲率半径 1200mm の球面としている。また、背面のリブパターンについては切り落としにて六角形に加工できるような形とした。0.7m 級ミラーの外形形状を図 3-14 に示す。

0.7m 級ミラーの製造過程を図 3-15 から図 3-17 に示す。CIP 実施前のパウダーが図 3-15、焼成前の軽量化加工実施過程が図 3-16、焼成後の外観形状が図 3-17 である。焼成前のグリーン体の状態で最終形状に近い状態まで軽量化加工を実施するニアネット加工を実施している。六角形への切り落とし実施前、円形状での完成状態を図 3-18 に示す。この 0.7m 級球面ミラー製造の際は円形ミラーを先に製造し、研削、研磨まで実施したのちに六角形に切り落とす工程とした。このミラーの有効範囲は $\phi 680\text{mm}$ であり、形状精度は 154nm RMS であった (図 3-19, 図 3-20)。

その後、六角形への切り出しを実施した。この切り出し加工において、加工直前の形状精度が 194nm RMS (図 3-21) であったのに対し、加工後の形状精度が 497nm RMS (図 3-22) まで変化した。この原因は完全に明確にはなっていないものの、材料内部の残留応力が切断加工によって解放されたのではないかと推定されている。切断加工を行い六角形状となったミラー単体での外形を図 3-23 に示す。

六角形となったミラーに対し、機械環境に対する耐性と面形状の変化を評価するため支持構造を設計し取り付けた。設計結果の概要を図 3-24 に示す。支持構造の材料はスーパーインバー (LEX-ZERO, 日本铸造) を使用し、形状は鏡面に変形を生じないように応力を緩和させるためのフレクシャを直交させて重ねた構造としている。セラミックスとの接続部は 2.3 節にて示したように金属パッドを接着し、この支持構造は金属パッドに対してボルト締結する形で固定した。ミラーに対するフレクシャの配置イメージを図 3-25 に示す。これらの配置や角度は自重や振動によって生じる支持構造や接着部の応力を最小化しつつ、鏡面下部へのアクセス性なども考慮して決定されている。

以上の過程を経て組立てられた 0.7m 級ミラーに対して、機械環境耐性を検証するため、振動試験、衝撃試験、音響試験を実施した。正弦波振動試験、衝撃試験、音響試験の各試験にて印加したレベルは、表 3-3、表 3-4、表 3-5 の通りである。各試験後の外観検査において損傷は確認されておらず、0.7m 級ミラーは印加した機械環境試験レベルに対して耐性を有することを確認した。

機械環境試験の前後においてレーザー干渉計 (DynaFiz, ZYGO) を用いて鏡面面形状の光学測定を実施した結果を図 3-26~図 3-28 に示す。組み立て、振動・衝撃試験前後の計測においては鞍型形状の変化が見られた。一方で音響試験前後での変化は微小な結果となっている。

試験後に構造数学モデルの合わせ込みを行った結果、試験結果と解析結果の固有振動数は 1000Hz 未満において各モードの周波数が概ね 4%以内で一致した。結果を表 3-6 に示す。非線形応答などは確認されなかった。なお、このモデルでは、接着部には線形コンタクトの固着を使用し、ボルトは梁要素にてモデル化し軸力も負荷、部品間の接触面には接触の線形コンタクトを定義している。

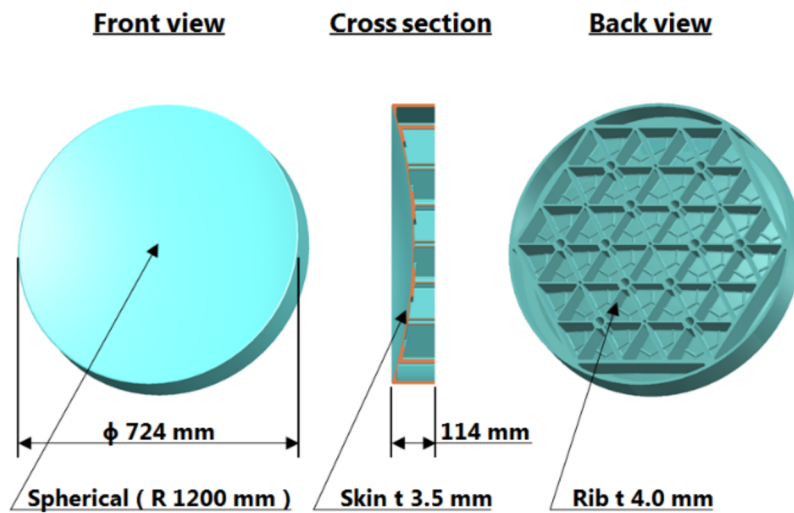


図 3-14 0.7m 級ミラーの設計形状¹⁴⁾

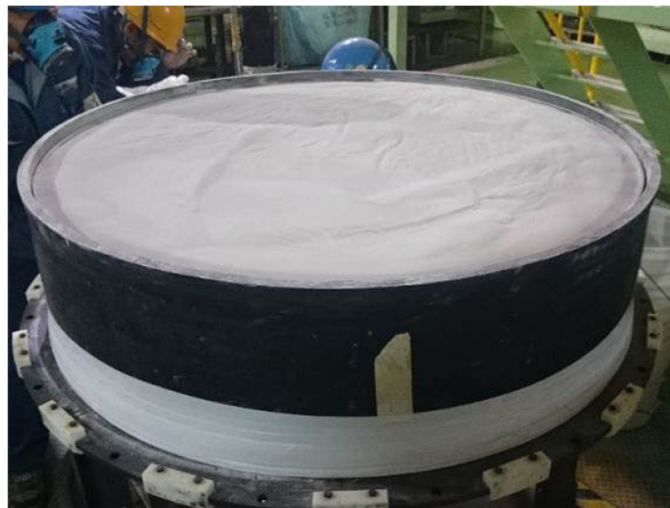


図 3-15 グリーン体製造過程における CIP 実施前のパウダー¹⁵⁾

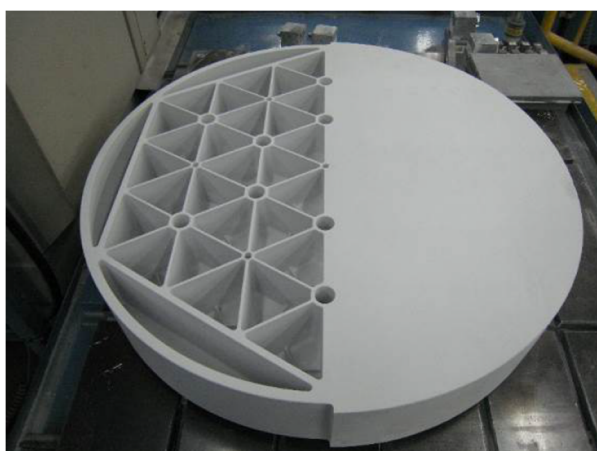


図 3-16 左半分軽量化加工を行った状態と完全に軽量化加工を行った状態¹⁵⁾

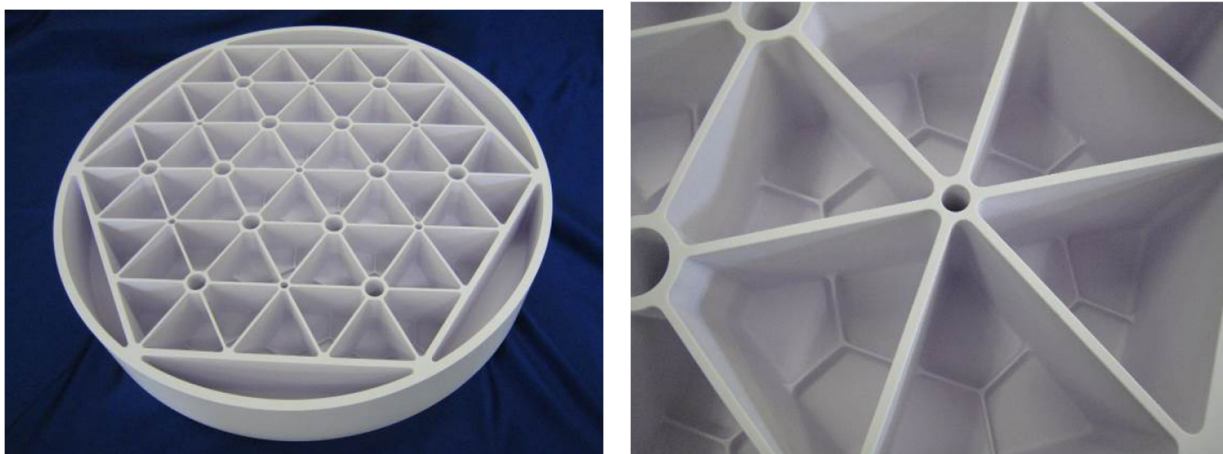


図 3-17 焼成体の外観およびリブ形状拡大¹⁵⁾

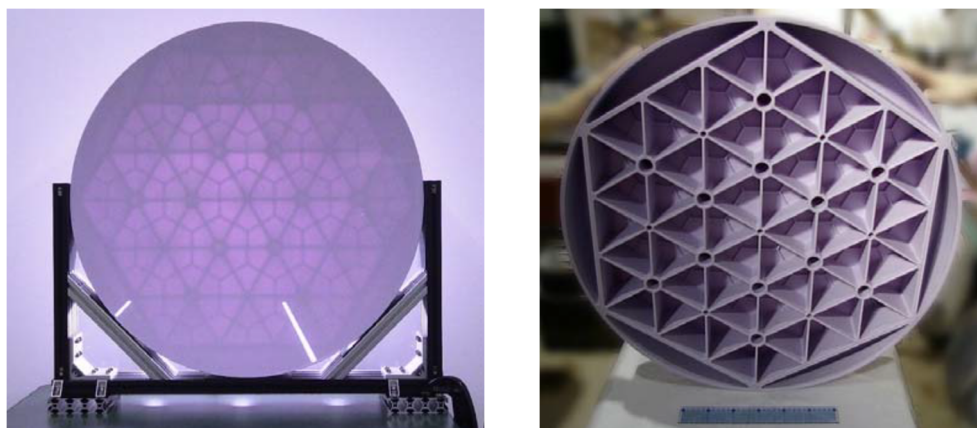


図 3-18 六角形切り出し前の 0.7m 級球面ミラー外観 (左: 鏡面, 右: 背面)¹⁵⁾



図 3-19 レーザー干渉計による球面形状精度の計測コンフィグレーション¹⁵⁾

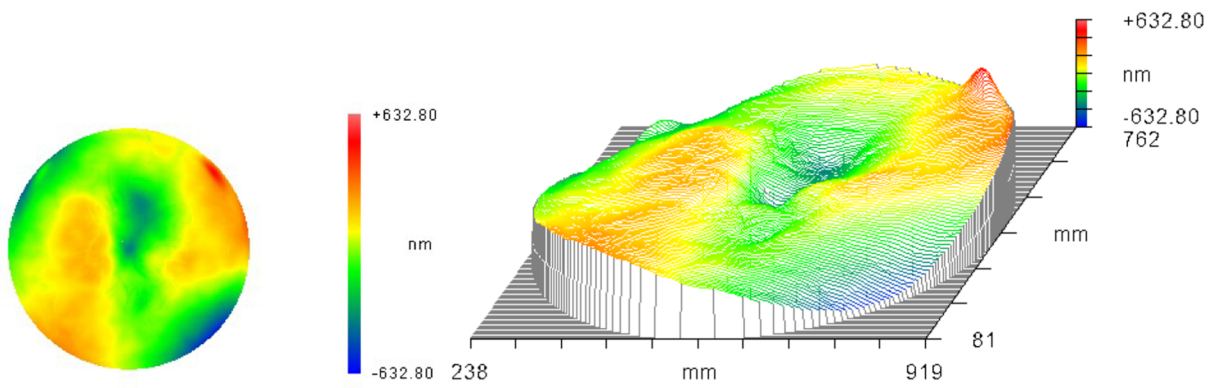


図 3-20 レーザー干渉計による球面からの変形形状¹⁵⁾

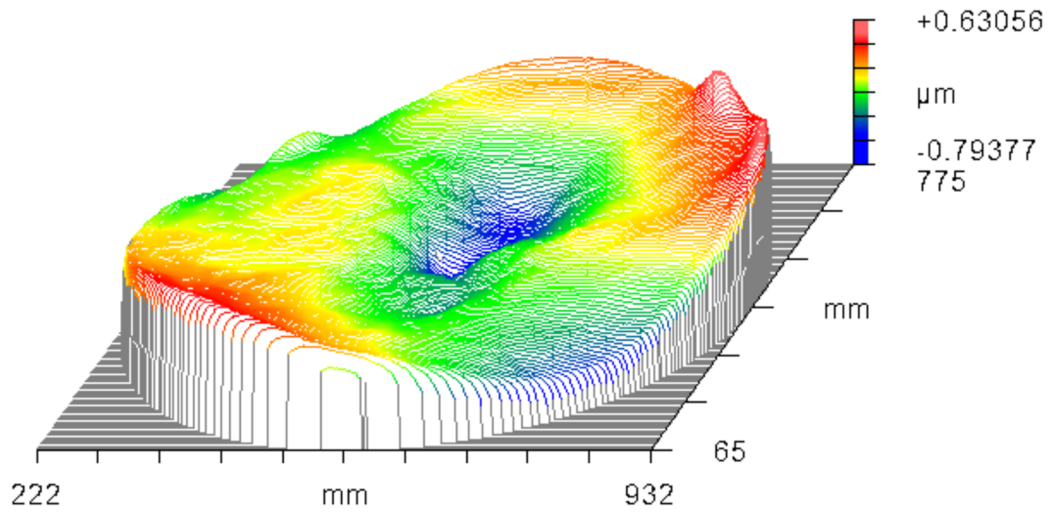


図 3-21 六角形切断加工前の表面形状¹¹⁾

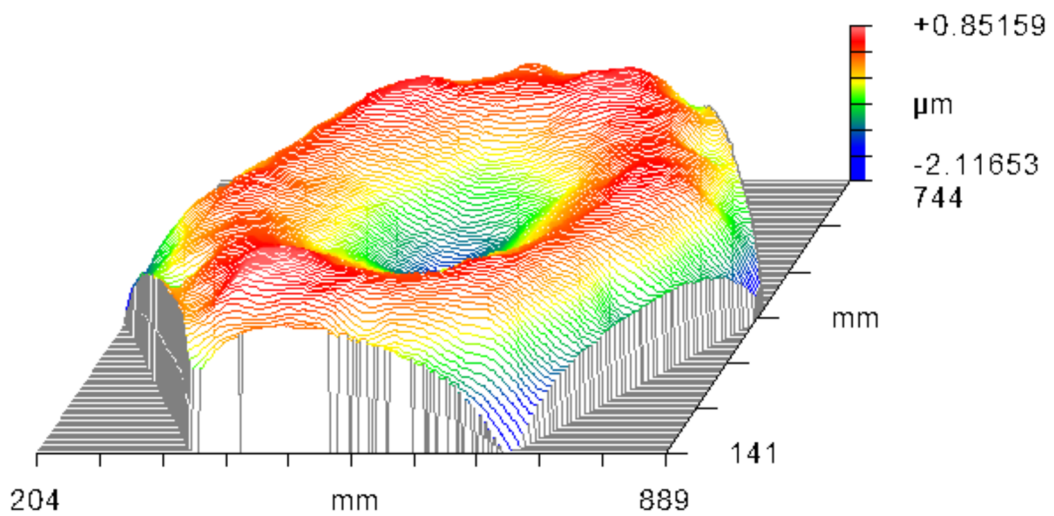


図 3-22 六角形切断加工後の表面形状¹¹⁾

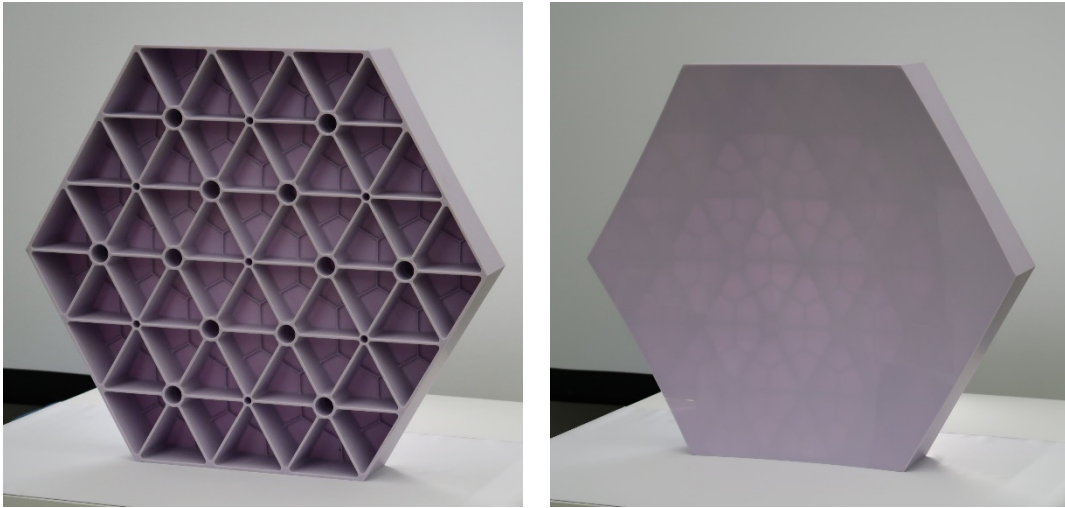


図 3-23 六角形切り出し加工後の 0.7m 級ミラー

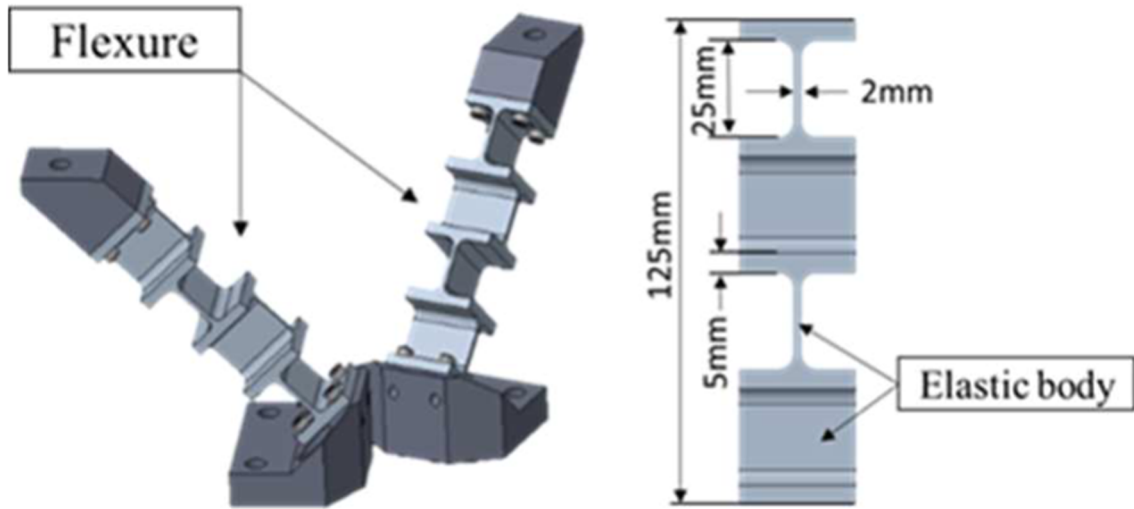


図 3-24 逆パイポッドによる支持構造の設計結果¹⁶⁾

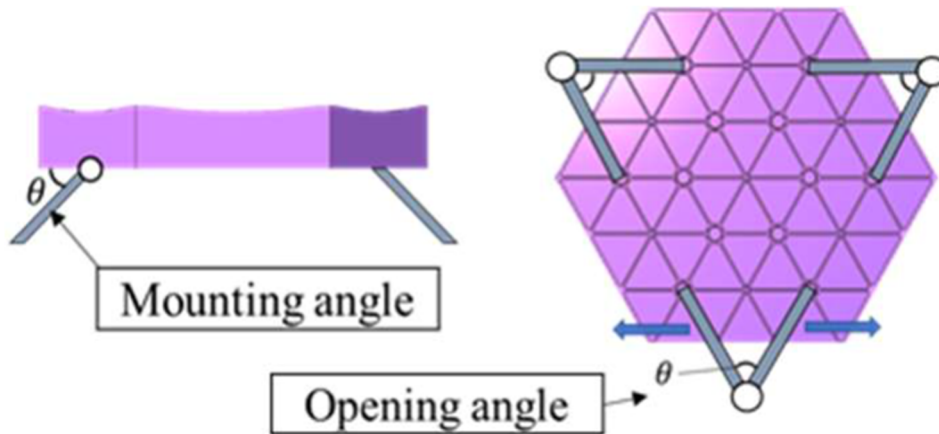


図 3-25 支持構造の配置¹⁶⁾

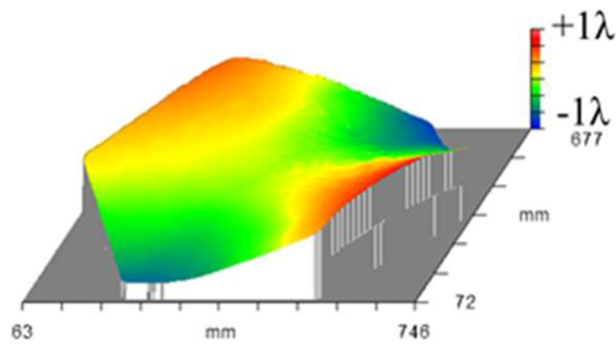


図 3-26 組み立て前後での面形状変化¹⁶⁾

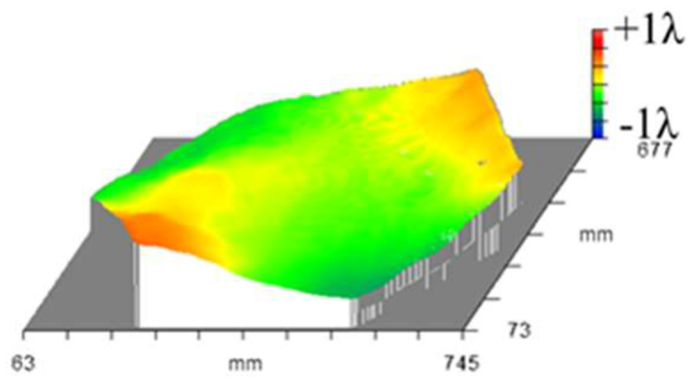


図 3-27 振動・衝撃試験前後での面形状変化¹⁶⁾

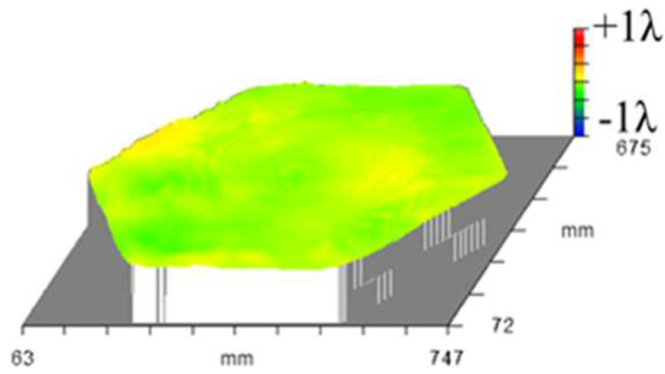


図 3-28 音響試験前後での面形状変化¹⁶⁾

表 3-3 正弦波振動試験 試験レベル

	周波数 (Hz)	加速度 (G)
垂直	5 - 11.4	約 40mm D.A.
	11.4 - 100	10
水平	5 - 15.4	約 40mm D.A.
	15.4 - 100	20

掃引速度 4 Oct/min

表 3-4 衝撃試験 試験レベル

	周波数 (Hz)	加速度 (Gsrs)
垂直/水平	100-800	8 (dB/Oct)
共通	800-3500	100

印加回数 1回

表 3-5 音響試験

	条件
音圧レベル	139 dB (O.A.)

表 3-6 構造数学モデルのコリレーション結果

面外固有値		
FEM 解析値 (Hz)	実測値 (Hz)	推定モード形状
280	282	面外並進
740	711	面外並進

面内固有値		
FEM 解析値 (Hz)	実測値 (Hz)	推定モード形状
218	219	面内並進
262	261	面内回転

3.3.3. 1.3m 級軽量化加工ミラー

最後に、将来の大型化を想定した製造試作を実施した。ここでは六角形形状の 1.3m 級のミラー（1.3m 級ミラー）の試作結果を紹介する^{17),18)}。この 1.3m 級ミラーを同心円状に 6 枚並べ、合成開口を行うことで、最大 3.6m 級の口径に相当する反射鏡と等価な光学性能を得ることが出来る。試作したミラーの仕様を表 3-7 に、形状を図 3-29 にそれぞれ示す。また、研磨後の 1.3m 級ミラーの写真を図 3-30 に、研磨前後の面形状計測結果を図 3-31 にそれぞれ示す。重力による変形分を除いた鏡面形状は 51nm RMS であり、試作目標としていた研磨精度を達成した。

表 3-7 1.3m 級ミラーの諸元¹⁰⁾

項目	諸元
素材	コーディエライトセラミックス
形状	六角形
開口径	1.3m 程度
鏡面形状	球面
曲率半径	11m 程度
面精度	63nm RMS 以下
面粗さ	2nm RMS 以下

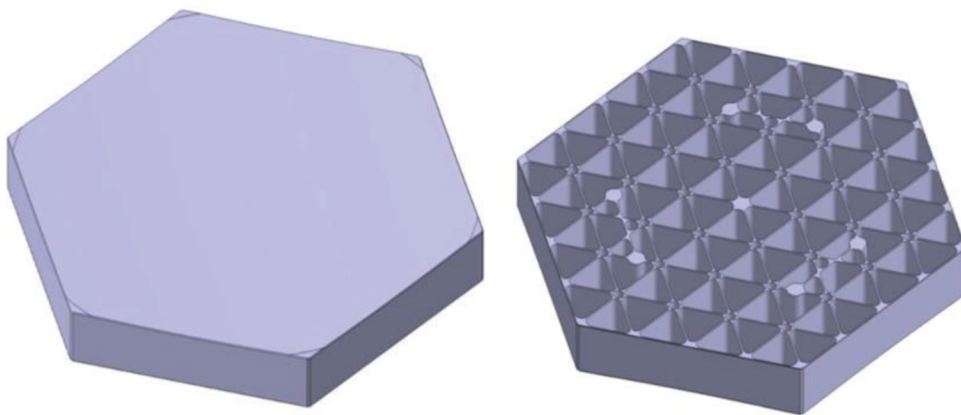


図 3-29 1.3m 級ミラーの形状

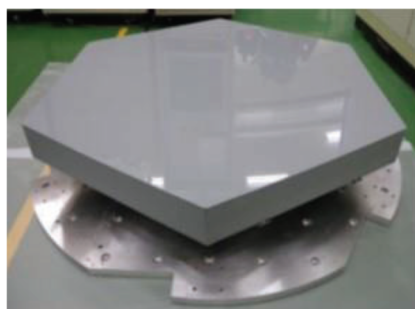


図 3-30 1.3m 級ミラーの研磨結果（支持構造あり）

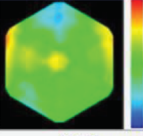
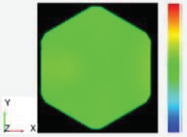
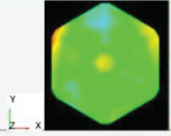
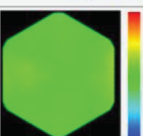
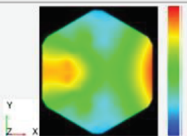

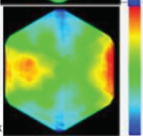
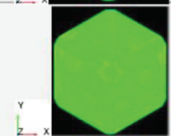
Item		X+1G attitude measurement (A)	X+1G gravity deformation (analysis) (B)	0G conversion measurement results (C=A-B)
Initial polishing (w/o power component)	Surface shape ($\pm 4\lambda$ range)			
	RMS value	652 nm rms		506 nm rms
Final polishing (w/o power component)	Surface shape ($\pm 4\lambda$ range)			
	Surface shape ($\pm 1\lambda$ range)			
	RMS value	253 nm rms		234 nm rms

図 3-31 1.3m 級ミラーの研磨性確認結果（測定時，光軸は重力方向に対して直交方向）¹⁰⁾

4. コーディエライトセラミックスの優位性についての考察

ここからは 1G 環境下および軌道上での熱変形を想定したセラミックスミラーの静加速度解析および熱変形解析の結果例を示す。また、比較のため同一形状、同一支持構造にて従来宇宙用ミラーの材料として用いられてきた低熱膨張ガラスセラミックスによる結果も併せて示し、コーディエライトセラミックスを宇宙用望遠鏡として用いた際の優位性を明らかにする。

4.1. ミラー形状および解析モデル

解析対象としたミラー母材の背面形状を図 4-1 に示す。これらの形状は、これまで試作されたセラミックスミラーを参照しつつ、本節の考察を行うために新たに設計したものである。リブ厚は 0.7m 級ミラーの実績から 4mm、リブ高さは外周でおよそ 130mm、頂点間の距離は約 1.3m とした。鏡面側の曲率は 1.3m 級ミラーの実績から 11m とした。また、リブ高さをおよそ 180mm としたモデルについても解析を行っている。これはリブ高さを増やすことによる幾何学的な剛性向上策の効果を検証することを目的としているが、リブ高さの比はコーディエライトセラミックスと低熱膨張ガラスセラミックスの弾性係数の比を考慮し、事前解析の結果から決定している。

この幾何形状のミラー母材に対してコーディエライトセラミックスおよび低熱膨張ガラスセラミックスの材料物性値を適用して構造解析を行った。各素材の特性を活かした形状最適化などは行っていない。どちらの材料も質量密度がほぼ同じであるため材料の差異による質量の差は生じない。モデル質量はリブ高さ 130mm のモデルで 49kg、リブ高さ 180mm で 65kg となる。解析に使用した有限要素モデルの形状パラメータ、材料およびモデル質量を表 4-1 に、リブ高さ 130mm のモデル外観を図 4-2 にそれぞれ示す。ミラー母材に対してはソリッド要素を用いた。支持構造はスーパーインバー合金の適用を想定し熱変形を抑制すると共に、両端を回転自由のビーム要素によりモデル化を行い、過拘束に起因する鏡面の変形を極力排除する理想的な 3 組のバイポッド支持を想定した。バイポッドの配置などはいくつかのミラーの設計例などを参考に配置した。支持構造自体は十分に高い剛性となるように、直径 30mm、厚み 5mm の円筒チューブ形状とし、インターフェース点（ミラー反対側の端点 6 点）をそれぞれ併進 3 自由度と軸周りの回転 1 自由度について拘束した(図 4-3)。

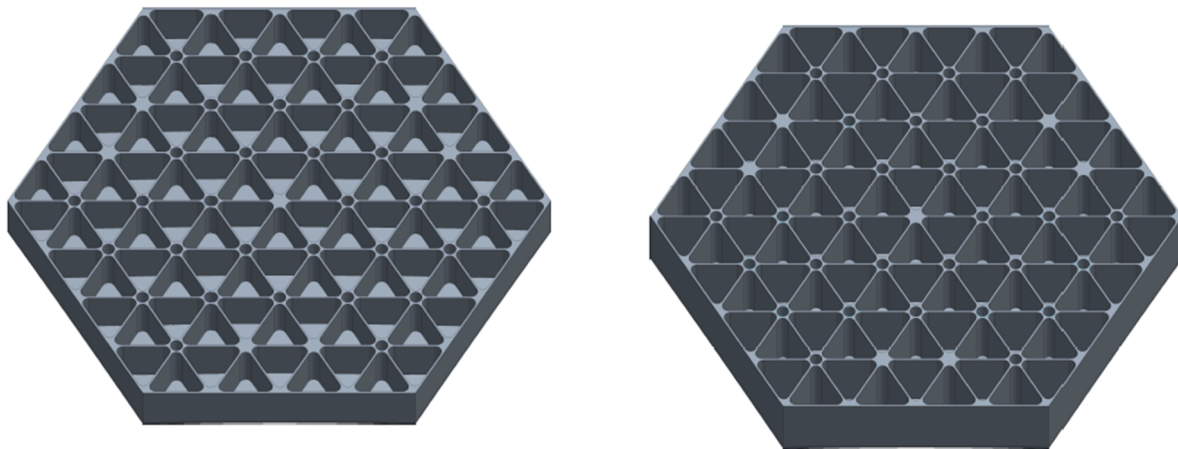


図 4-1 ミラー母材の背面形状外観
(左：リブ高さ 130mm, 右：リブ高さ 180mm)

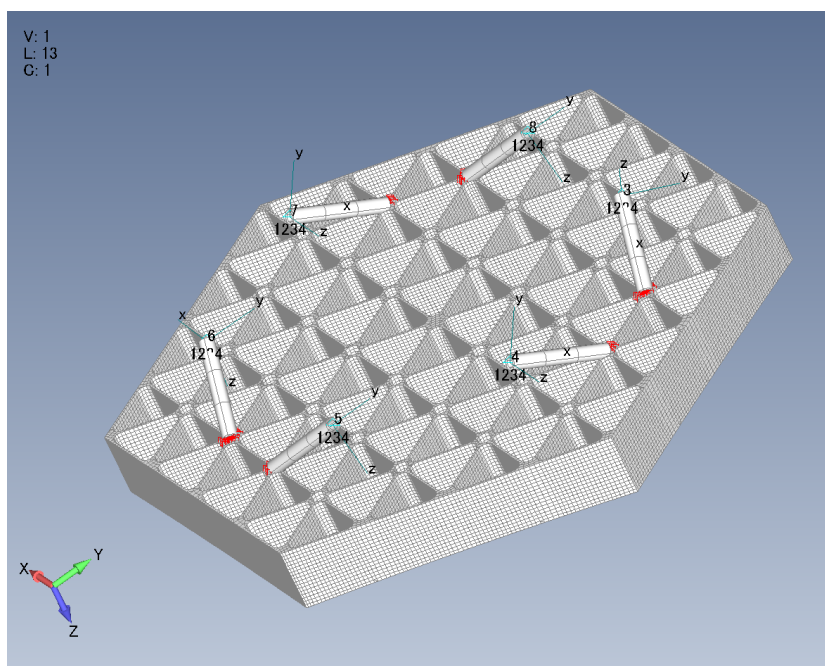


図 4-2 ミラー母材の有限要素モデル (リブ高さ 130mm)

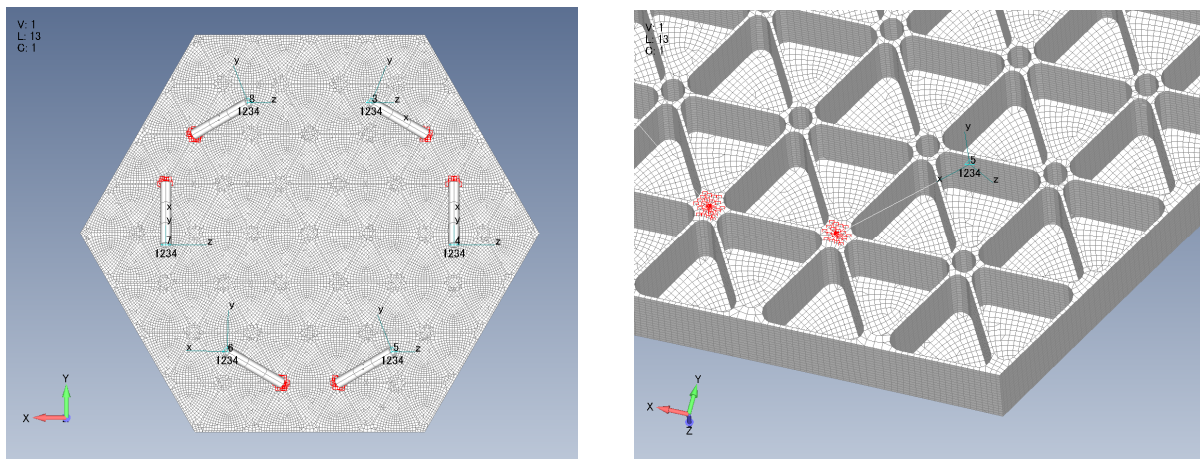


図 4-3 支持構造の配置（左）および支持構造近傍モデルの拡大図（右）

表 4-1 有限要素モデルの形状パラメータ，材料，モデル質量

項目	M001	M002	M003	M004
頂点間距離 (m)	約 1.3			
リブ厚さ (mm)	4.0			
反射面形状(曲率半径 (m))	球面 (約 11)			
エッジでのリブ高さ (mm)	約 130	約 180	約 130	約 180
ミラー母材	コーディエライトセラミックス		低熱膨張ガラスセラミックス	
モデル質量*1 (kg)	49	65	49	65

*1 密度に大きな差がないため、同一形状ではガラスセラミックス、コーディエライトセラミックスとも有効桁内で同一質量となる

4.2. 固有値解析

4.1 節で説明した 4 ケースの固有値解析結果を表 4-2 に示す。コーディエライトセラミックス、リブ高さ 130mm モデル (M001) の 10 次までのモードの変形形状図を表 4-3 に示す。

図 4-4 は、横軸にモード番号、縦軸に固有周波数として図示したものである。暖色 (赤, オレンジ) がコーディエライトセラミックス, 寒色 (青, 水色) が低熱膨張ガラスセラミックスの結果をそれぞれ表している。低次モードでは比剛性の差が支配的であるが, 6 次モードあたりからリブ高さの影響が表れている。10 次までのモードにおいてはおよそコーディエライトセラミックスのリブ高さ 130mm (M001) と低熱膨張ガラスセラミックスのリブ高さ 180mm (M004) で近い固有周波数となる。

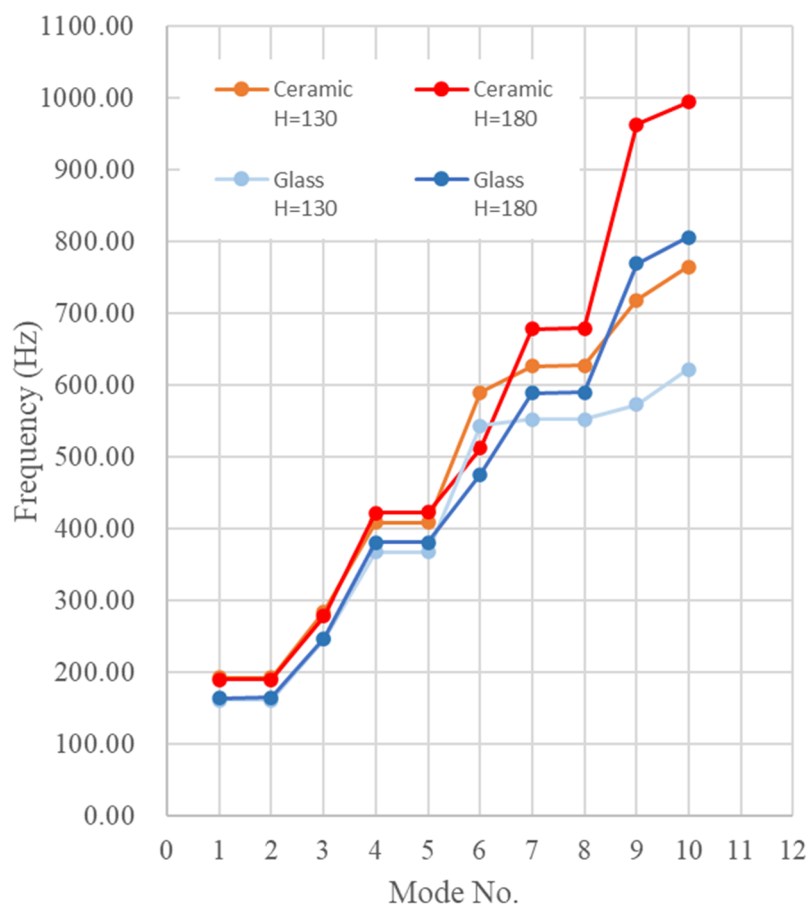
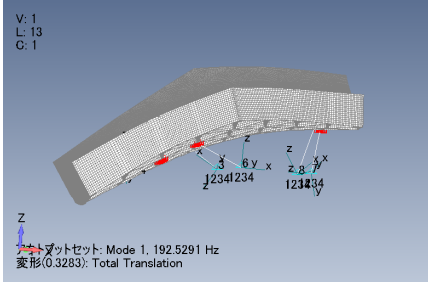
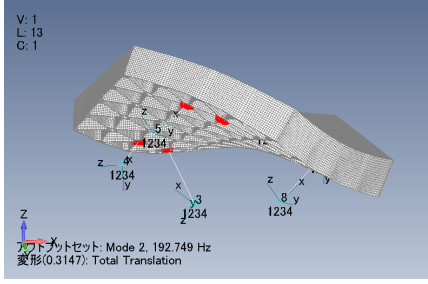
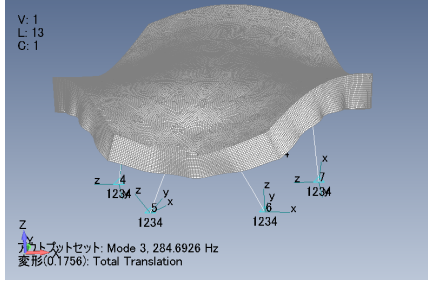
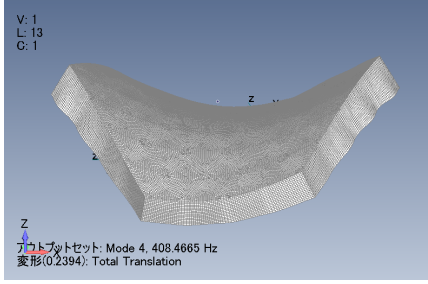
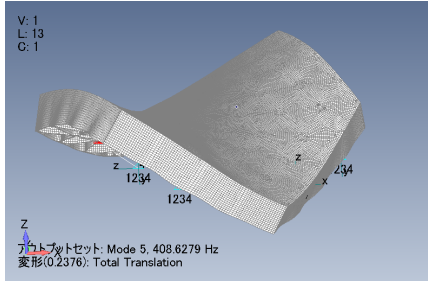
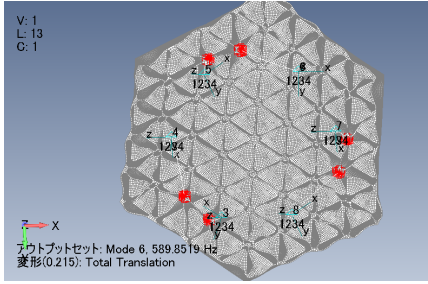
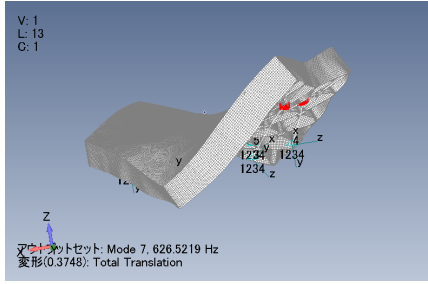
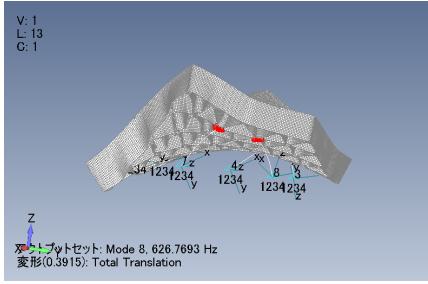
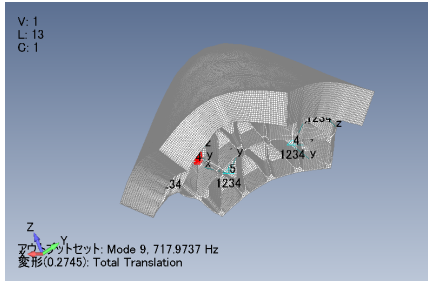
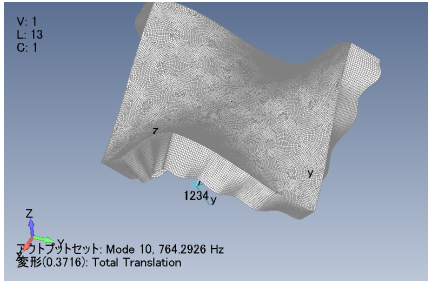


図 4-4 ミラー形状と素材の違いによる固有周波数の差異

表 4-2 固有値解析結果 (Hz)

Mode No.	M001	M002	M003	M004
1	193	189	161	164
2	193	189	162	164
3	285	278	246	247
4	408	422	367	380
5	409	422	367	381
6	590	512	543	475
7	627	678	552	589
8	627	679	553	590
9	718	963	573	769
10	764	994	622	806

表 4-3 10次までのモードの変形形状図(M001)

 <p>V: 1 L: 13 C: 1</p> <p>アクトブットセット: Mode 1, 192.5291 Hz 変形(0.3283): Total Translation</p> <p>Mode 1</p>	 <p>V: 1 L: 13 C: 1</p> <p>アクトブットセット: Mode 2, 192.749 Hz 変形(0.3147): Total Translation</p> <p>Mode 2</p>
 <p>V: 1 L: 13 C: 1</p> <p>アクトブットセット: Mode 3, 284.6926 Hz 変形(0.1756): Total Translation</p> <p>Mode 3</p>	 <p>V: 1 L: 13 C: 1</p> <p>アクトブットセット: Mode 4, 408.4665 Hz 変形(0.2394): Total Translation</p> <p>Mode 4</p>
 <p>V: 1 L: 13 C: 1</p> <p>アクトブットセット: Mode 5, 408.6279 Hz 変形(0.2376): Total Translation</p> <p>Mode 5</p>	 <p>V: 1 L: 13 C: 1</p> <p>アクトブットセット: Mode 6, 589.8519 Hz 変形(0.215): Total Translation</p> <p>Mode 6</p>
 <p>V: 1 L: 13 C: 1</p> <p>アクトブットセット: Mode 7, 626.5219 Hz 変形(0.3748): Total Translation</p> <p>Mode 7</p>	 <p>V: 1 L: 13 C: 1</p> <p>アクトブットセット: Mode 8, 626.7693 Hz 変形(0.3915): Total Translation</p> <p>Mode 8</p>
 <p>V: 1 L: 13 C: 1</p> <p>アクトブットセット: Mode 9, 717.9737 Hz 変形(0.2745): Total Translation</p> <p>Mode 9</p>	 <p>V: 1 L: 13 C: 1</p> <p>アクトブットセット: Mode 10, 764.2926 Hz 変形(0.3716): Total Translation</p> <p>Mode 10</p>

4.3. 静荷重解析による変形評価

ここでは地上の重力環境下における鏡面変形量について、静荷重解析によって求めた結果を示す。荷重条件は有限要素モデルの各軸に 1G を付加する 3 ケースである (表 4-4)。拘束条件は固有値解析と同様に、支持構造のインターフェース点 6 点の併進 3 自由度および軸周りの回転 1 自由度を拘束した。代表して、コーディエライトセラミックス、リブ高さ 130mm (M001) の形状変形図を表 4-5 に示す。そのほかのモデルについても変形の傾向はほぼ同一である。

各解析結果について鏡面の変形を Zernike 多項式解析により分析した。解析結果からピストン (Z_0^0 , Noll 指数 1), チルト (Z_1^{-1} , Noll 指数 3), パン (Z_1^{+1} , Noll 指数 2), デフォーカス (Z_2^0 , Noll 指数 4) を除いた鏡面の変形量を表したコンター図, および係数のうちピストンを除いたものを Noll 指数順に並べて各項の比率を示したものが表 4-6 (X-1G), 表 4-7 (Y-1G), 表 4-8 (Z-1G) である。ここでは代表してコーディエライトセラミックスの結果を載せているが, 変形の分布や係数同士の大きさの比率については素材を変えても同一の結果となる。

表から明らかなおとおり, リブの高さによって変形形状のトレンドは変化しない。X-1G, Y-1G (ミラー面内方向の荷重) に対しては支持構造の配置の対称性により, Noll 指数 5, 6 の非点収差 (Z_2^{+2}, Z_2^{-2}) の変形が多くみられる。一方で, Z-1G (ミラー光軸方向の荷重) に対しては支持構造の配置に従って Noll 指数 9 のトレフォイル (Z_3^{-3}) が現れる。また, X-1G, Y-1G ではデフォーカス成分はほぼ含まれない一方で, Z-1G には含まれることが確認できる。

各モデルの解析結果を Zernike 多項式解析で分析した結果について, デフォーカスのみ, およびピストン, チルト, パン, デフォーカスの 4 成分を除いた主に望遠鏡で問題となる残渣 (以降, デフォーカスを除く鏡面形状変形と呼ぶ) に分けて整理した結果を表 4-9 に示す。素材間の比較を行うと, コーディエライトセラミックスは低熱膨張ガラスセラミックスよりも変形量が小さい。これは素材の比剛性の差異によるものである。次に Z-1G の荷重ケースに着目すると, コーディエライトセラミックスの 130mm (M001) と低熱膨張ガラスセラミックスのリブ高さ 180mm (M004) の変形量がほぼ等しい結果である。ところが, X-1G, Y-1G の荷重ケースでは M004 のデフォーカスを除く鏡面形状変形が M001 よりも大きくなる傾向が見られる。これは, デフォーカスを除く鏡面形状変形がリブ自身の変形に起因しているため, リブ高さが高いほど変形量が大きくなるためと推測される。

表 4-4 静荷重解析ケース

Case No.	ケース名	荷重条件
S001	静解析-X1G	モデル全体に対して-X方向に1G負荷
S002	静解析-Y1G	モデル全体に対して-Y方向に1G負荷
S003	静解析-Z1G	モデル全体に対して-Z方向に1G負荷

表 4-5 静荷重解析による形状変形 (M001)

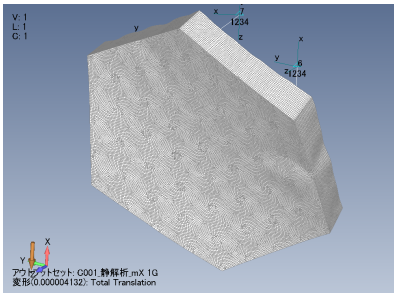
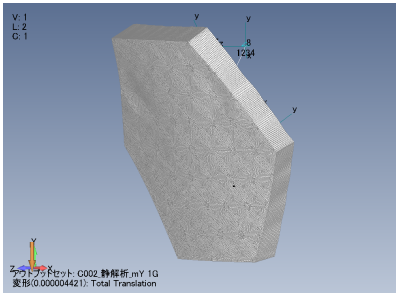
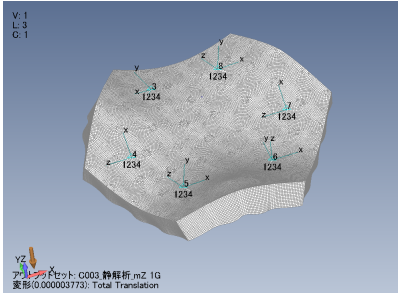
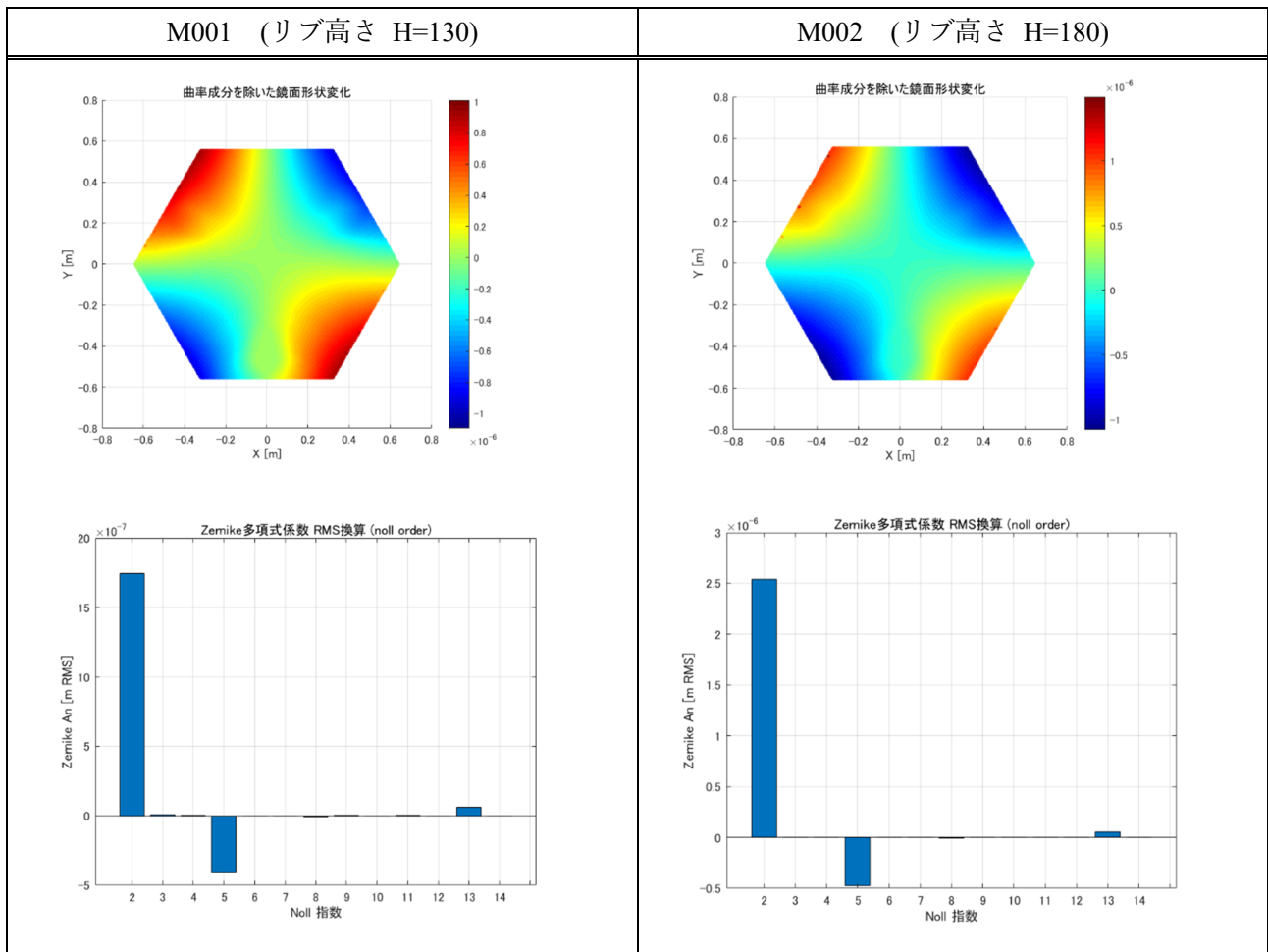
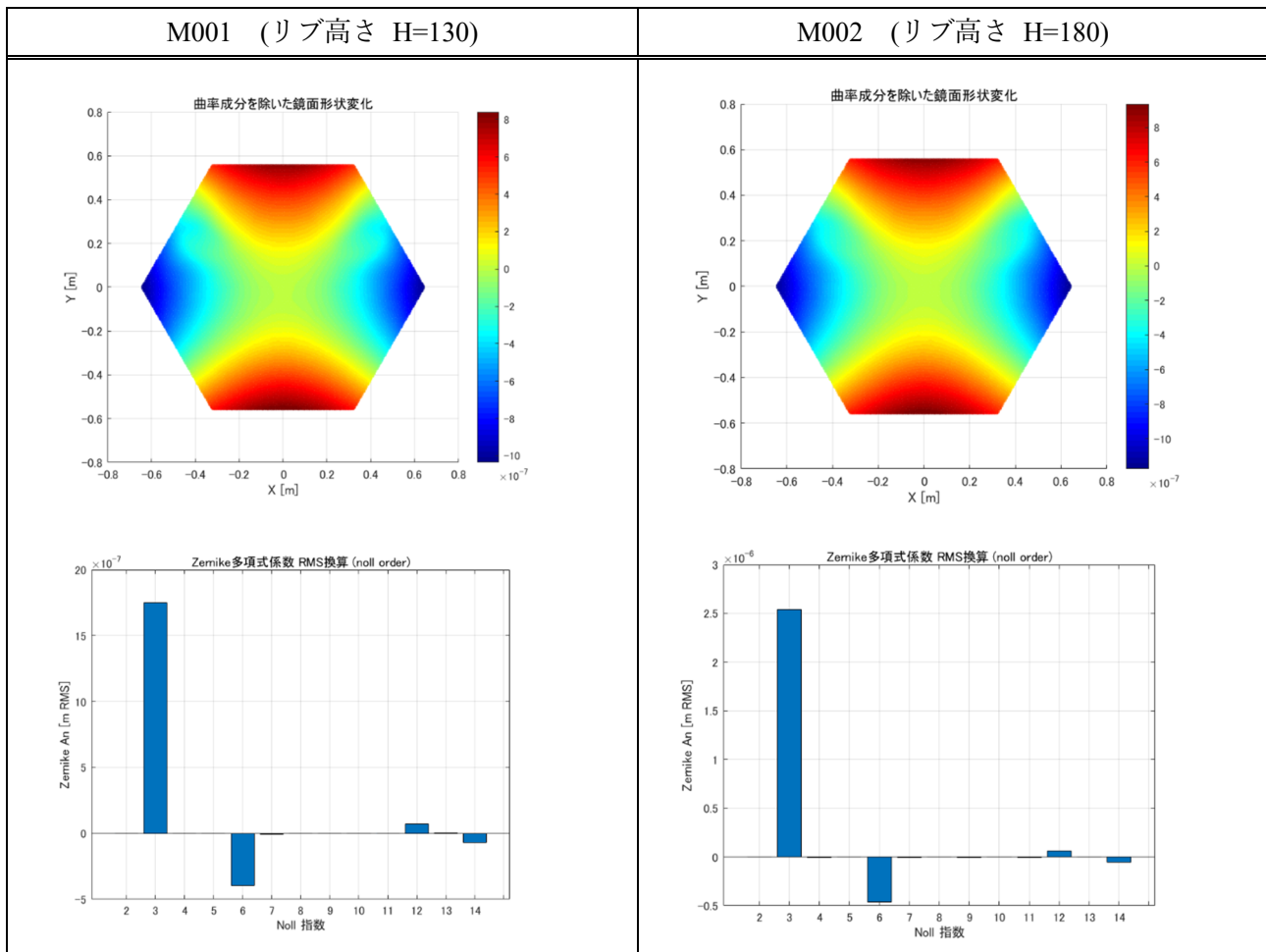
S001 (X-1G)	S002 (Y-1G)	S003 (Z-1G)
 <p>V: 1 L: 1 G: 1</p> <p>モデル全体に対して-X方向に1G負荷</p> <p>ファイルセット: C001 静解析-mX 1G 変形(0.000004132): Total Translation</p>	 <p>V: 1 L: 2 G: 1</p> <p>モデル全体に対して-Y方向に1G負荷</p> <p>ファイルセット: C002 静解析-mY 1G 変形(0.000004421): Total Translation</p>	 <p>V: 1 L: 3 G: 1</p> <p>モデル全体に対して-Z方向に1G負荷</p> <p>ファイルセット: C003 静解析-mZ 1G 変形(0.000003773): Total Translation</p>

表 4-6 Zernike 多項式解析による鏡面変形解析結果 (S001, X-1G)



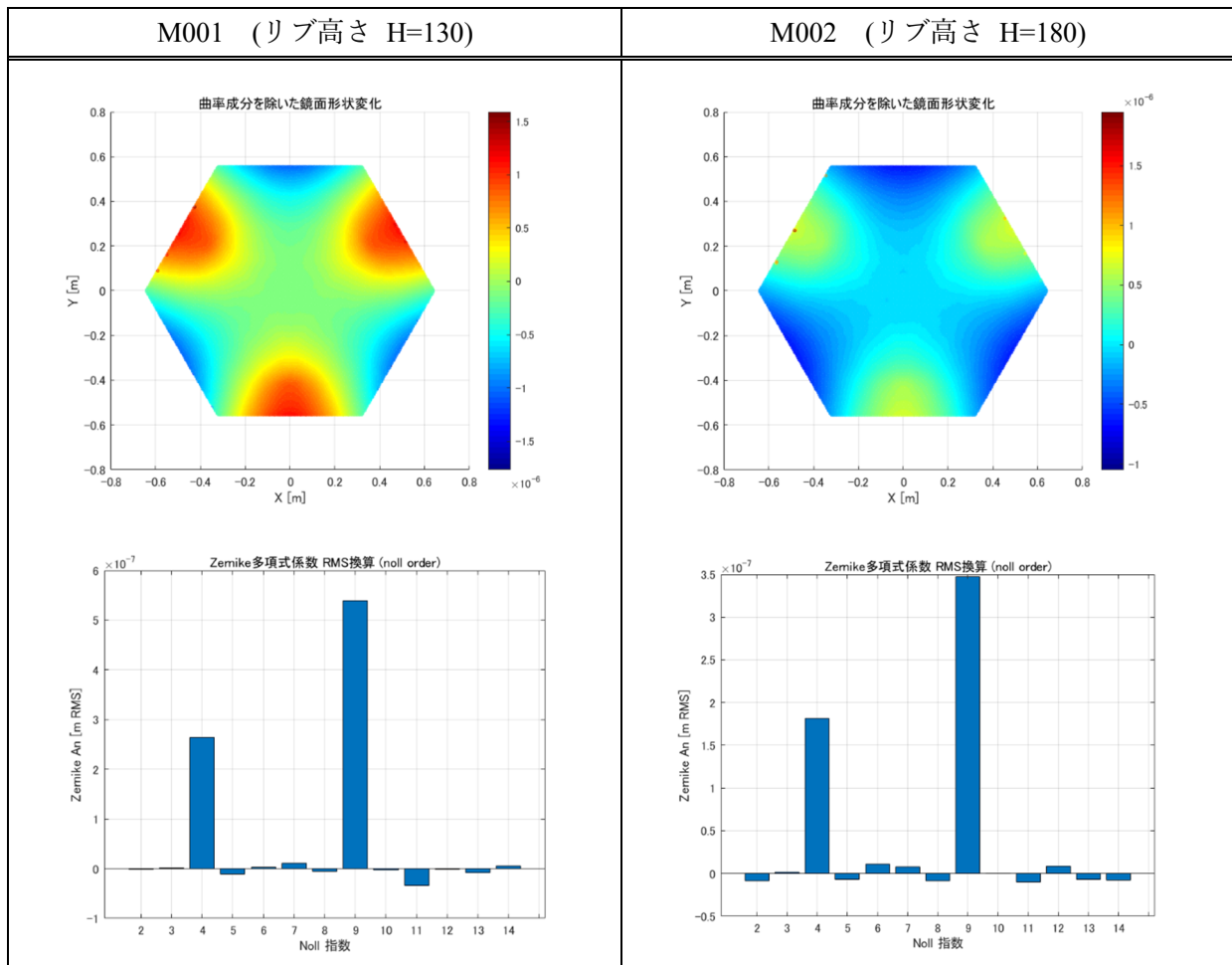
コンター図はピストン(Z_0^0), チルト(Z_1^{-1}), パン(Z_1^{+1}), デフォーカス(Z_2^0)を除いた成分を示す
 係数グラフは Noll 指数 1 のピストン(Z_0^0)を除く

表 4-7 Zernike 多項式解析による鏡面変形解析結果 (S002, Y-1G)



コンター図はピストン(Z_0^0), チルト(Z_1^{-1}), パン(Z_1^1), デフォーカス(Z_2^0)を除いた成分を示す
 係数グラフは Noll 指数 1 のピストン(Z_0^0)を除く

表 4-8 Zernike 多項式解析による鏡面変形解析結果 (S003, Z-1G)



コンター図はピストン(Z_0^0), チルト(Z_1^{-1}), パン(Z_1^{+1}), デフォーカス(Z_2^0)を除いた成分を示す
 係数グラフは Noll 指数 1 のピストン(Z_0^0)を除く

表 4-9 静荷重解析によるデフォーカスを除く鏡面形状変形およびデフォーカスの大きさ
(単位 : nm RMS)

Model	S001 (X-1G)		S002 (Y-1G)		S003 (Z -1G)	
	デフォーカス	鏡面形状変形(デフォーカス除く)	デフォーカス	鏡面形状変形(デフォーカス除く)	デフォーカス	鏡面形状変形(デフォーカス除く)
M001 (コーディエライト, H=130)	2.2	424	3.4	421	264	559
M002 (コーディエライト, H=180)	2.5	486	4.9	479	182	362
M003 (低熱膨張ガラスセラ ミックス, H=130)	3.8	668	5.1	663	411	869
M004 (低熱膨張ガラスセラ ミックス, H=180)	4.4	765	8.3	753	283	561

4.4. 静荷重解析による強度評価

4.3 節の静荷重解析からミラー母材の強度評価を行った。代表例として、M001 の最大主応力分布を表示したものを表 4-10 に示す。また、各モデルの各解析ケースにおける最大主応力を表 4-11 に示す。

表 4-11 は各軸 1G 下での解析結果であるが、例えば打ち上げ環境を 10G と想定する場合には最大主応力も表中の値の 10 倍となる。コーディエライトセラミックスおよび低熱膨張ガラスセラミックスの材料強度は 2.1 節で示しているが、10G を想定した場合でもまだ安全余裕は確保できる。ただし、付録に示す通り、脆性材料の強度は荷重を受ける面積に依存することに留意する必要がある。また、主応力の高くなる個所は支持構造とのインターフェース周辺に偏っている。将来的にリブ形状の最適化が可能となり応力分布を分散させることが可能になれば、さらなる軽量化を期待することも可能である。

表 4-10 静荷重解析によるミラー母材最大主応力の分布図 (M001)

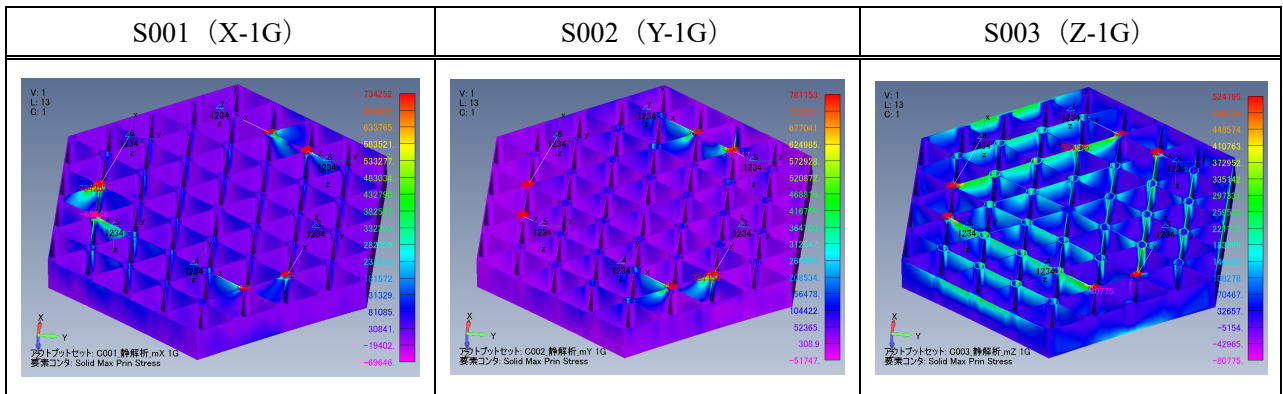


表 4-11 各モデルの最大主応力 (単位 : MPa)

Model	S001 (X-1G)	S002 (Y-1G)	S003 (Z-1G)
M001 (コーディエライト, H=130)	0.73	0.78	0.52
M002 (コーディエライト, H=180)	0.91	0.95	0.57
M003 (低熱膨張ガラスセラミックス, H=130)	0.73	0.78	0.51
M004 (低熱膨張ガラスセラミックス, H=180)	0.90	0.95	0.57

4.5. 熱変形解析結果

次に軌道上での熱変形を想定し、鏡面の温度分布による形状変形について解析した結果を示す。モデルは M001 および M003 を使用した。拘束点もこれまでと同様に支持構造のインターフェース点をそれぞれ並進 3 自由度および軸周り 1 自由度を拘束した。解析を行った温度条件 6 ケースを表 4-12 に示す。本来軌道上においては搭載位置や機体形状、軌道に応じた温度分布が生じるが、ここでは単純な温度分布に対する変形を確認するため、Y 軸方向（ミラー面内方向）および Z 軸方向（ミラー光軸方向）に一定の傾斜で温度分布が付いた場合を想定した（図 4-5）。また、本解析では線膨張係数の温度依存性を考慮している。よって、温度条件は温度幅である ΔT のほかに、最小温度と最大温度の値も結果に影響する。線膨張係数の温度依存性はコーディエライトセラミックスおよび低熱膨張ガラスセラミックスともに付録の実測結果を使用している。

静荷重解析と同様に、各解析結果について鏡面の変形を Zernike 多項式解析により分析した。結果を表 4-13 から表 4-18 に示す。また、各モデルの解析結果を Zernike 多項式解析で分析した結果について、デフォーカスのみとデフォーカスを除く鏡面形状変形に分けて整理した結果を表 4-19, 表 4-20 に示す。コーディエライトセラミックスと低熱膨張ガラスセラミックスの変形形状を見ると双方で傾向が顕著に異なっているが、これは線膨張係数の温度依存性によるためである。コーディエライトセラミックスでは線膨張係数の符号が反転するゼロクロス点が存在するため、低熱膨張ガラスセラミックスとは異なる変形形状となる。表 4-19 に示す面内 Y 軸方向の温度傾斜によるデフォーカスを除く鏡面形状変形をみると、温度差が小さい T001 の結果においてはコーディエライトセラミックスの変形が小さいものの、温度差が大きい T003 になると反対に低熱膨張ガラスセラミックスの変形量のほうが小さい結果となっている。この傾向は付録にて示す線膨張係数の温度依存性から推測することができる。ミラーの光軸(Z)方向に温度差が付いた場合、変形は大半がデフォーカスである（表 4-20）。ただし Zernike 多項式解析のデフォーカス項の符号に表される通りコーディエライトセラミックスと低熱膨張ガラスセラミックスで反りの向き（凹凸）が反転している。また、コーディエライトセラミックスにおいては光軸方向の温度勾配による変形においてデフォーカスが顕著に低熱膨張ガラスセラミックスよりも小さくなる傾向がみられる。これらは、コーディエライトセラミックスの CTE が温度依存性によって表裏の間でゼロクロスして反転していることによると推定される。つまり、低熱膨張ガラスセラミックスは光軸方向の温度差によって表面が縮み裏面が膨張するのに対して、コーディエライトセラミックスは途中で CTE の符号が反転するため表面と裏面がどちらも膨張する変形となっていることに起因すると考えられる。

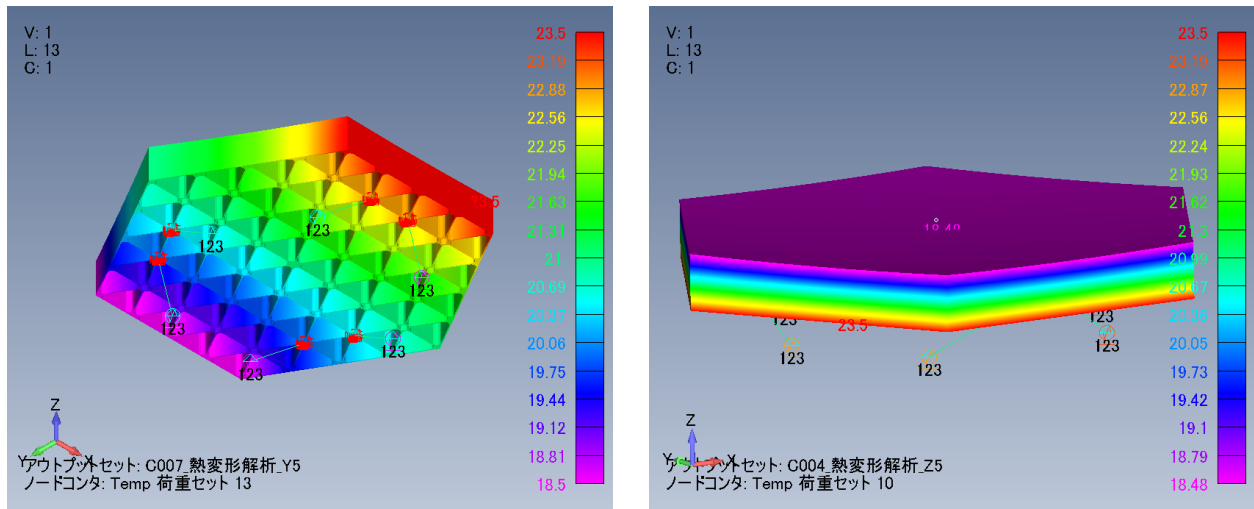
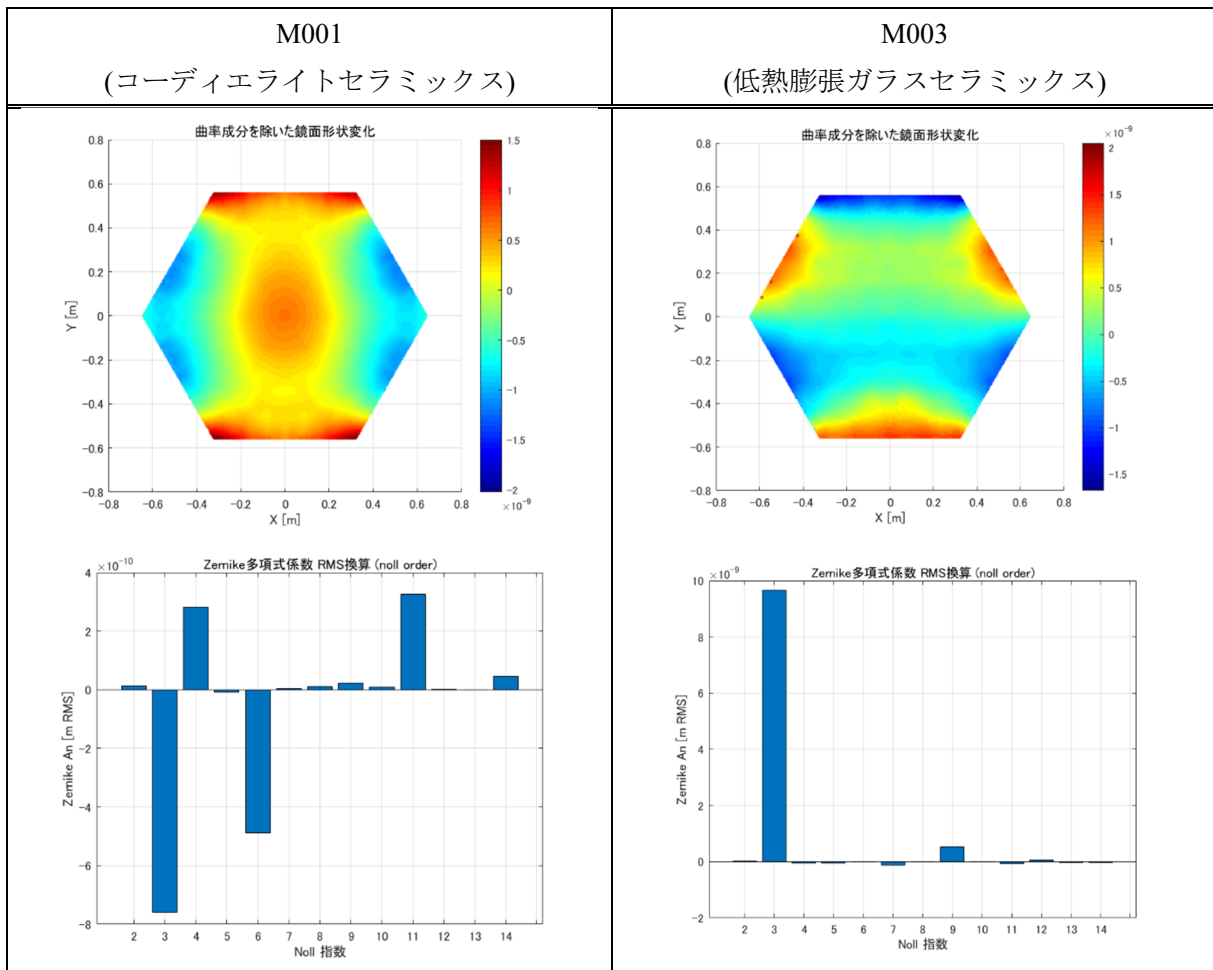


図 4-5 熱変形解析で想定した温度分布 (左) ミラー面内方向 (右) ミラー光軸方向

表 4-12 熱変形解析の荷重条件 (単位 : °C)

Case No.	ケース名	温度傾斜方向	温度幅	最小温度	中央温度	最大温度
T001	温度分布 面内 5°C	Y (面内方向)	5	18.5	21	23.5
T002	温度分布 面内 10°C		10	16	21	26
T003	温度分布 面内 20°C		20	11	21	31
T004	温度分布 光軸 5°C	Z (光軸方向)	5	18.5	21	23.5
T005	温度分布 光軸 10°C		10	16	21	26
T006	温度分布 光軸 20°C		20	11	21	31

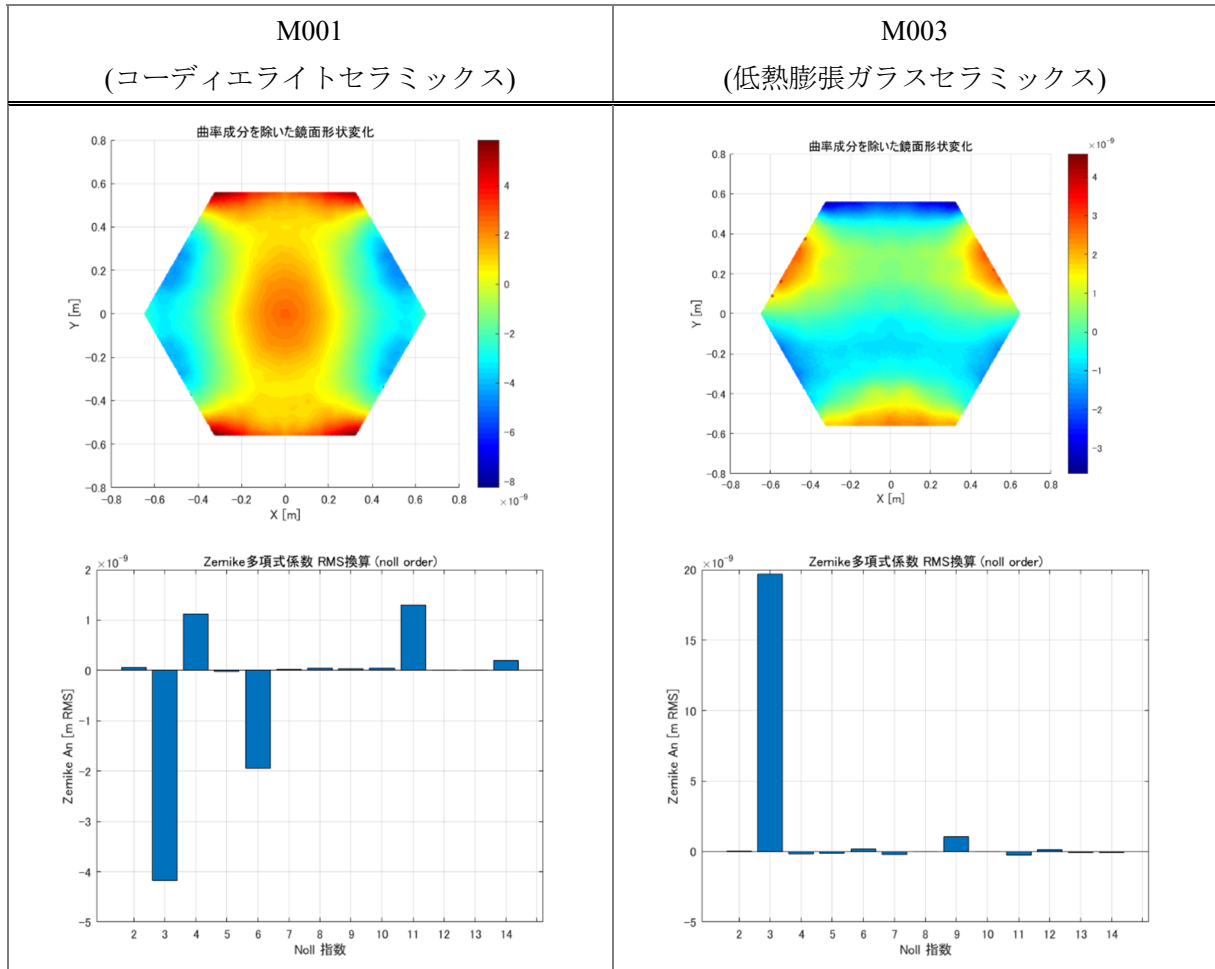
表 4-13 Zernike 多項式解析による鏡面変形解析結果 (T001, 温度分布 面内 5°C)



コンター図はピストン(Z_0^0), チルト(Z_1^{-1}), パン(Z_1^{+1}), デフォーカス(Z_2^0)を除いた成分を示す

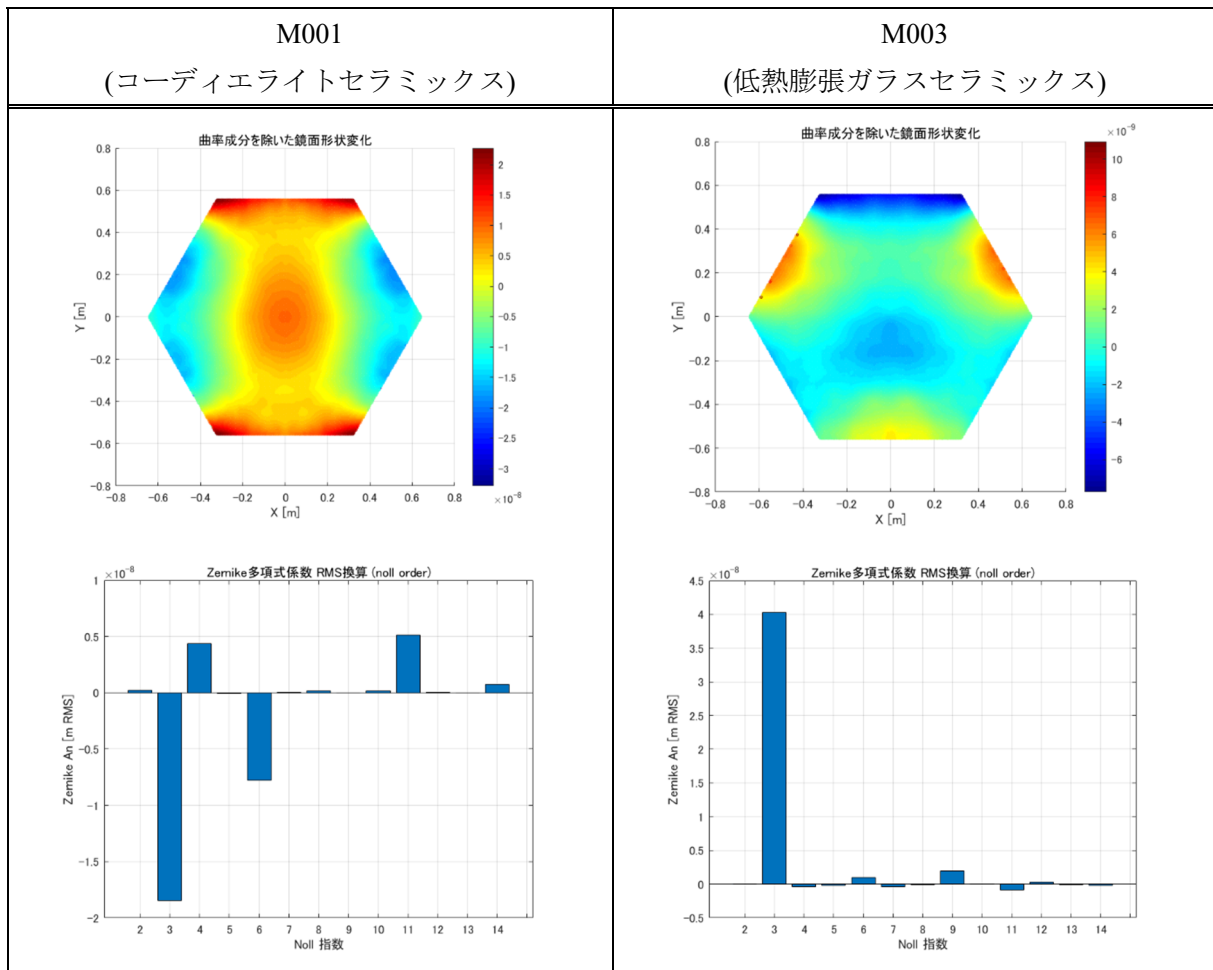
係数グラフは Noll 指数 1 のピストン(Z_0^0)を除く

表 4-14 Zernike 多項式解析による鏡面変形解析結果 (T002, 温度分布 面内 10°C)



コンター図はピストン(Z_0^0), チルト(Z_1^{-1}), パン(Z_1^{+1}), デフォーカス(Z_2^0)を除いた成分を示す
 係数グラフは Noll 指数 1 のピストン(Z_0^0)を除く

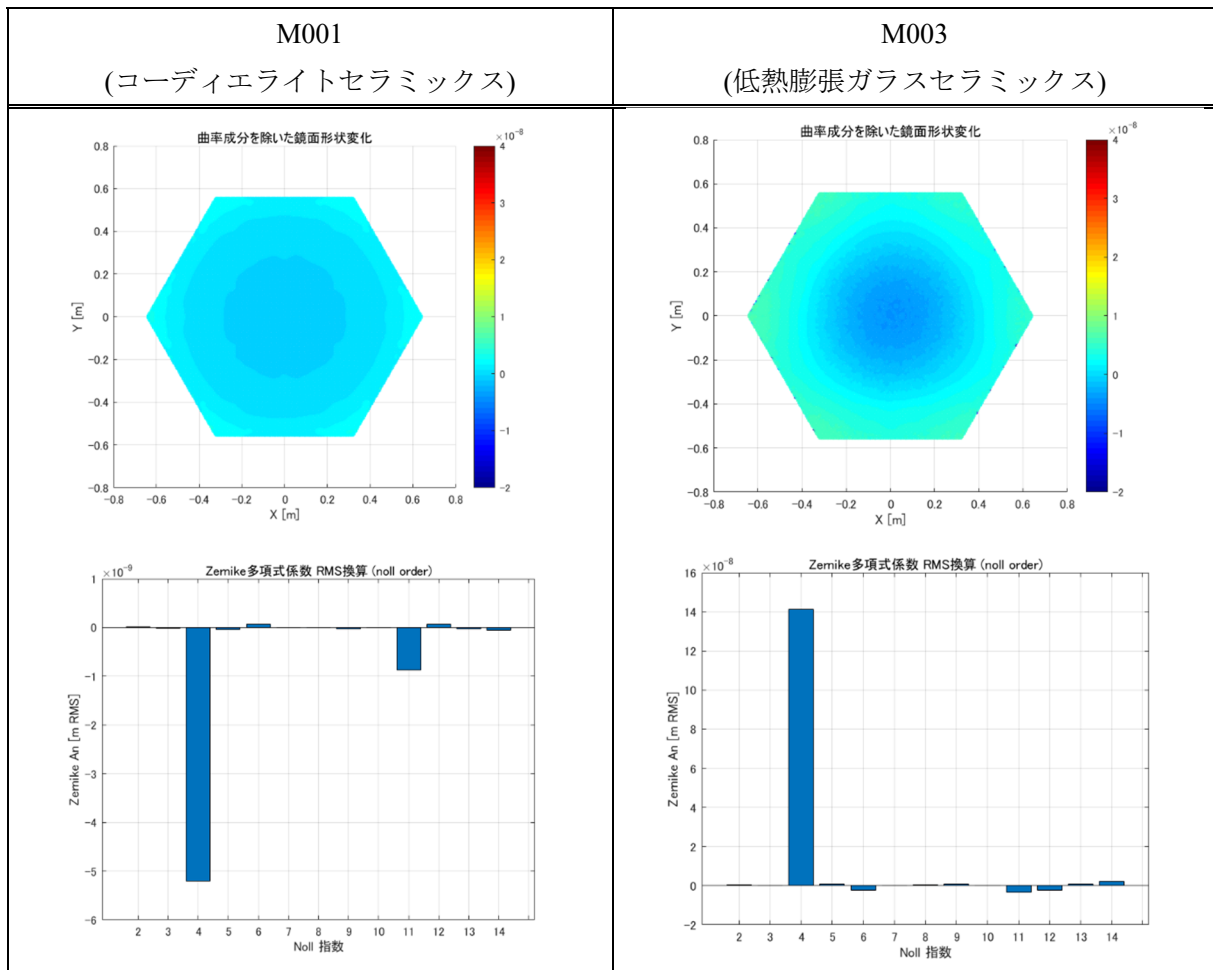
表 4-15 Zernike 多項式解析による鏡面変形解析結果 (T003, 温度分布 面内 20°C)



コンター図はピストン(Z_0^0), チルト(Z_1^{-1}), パン(Z_1^1), デフォーカス(Z_2^0)を除いた成分を示す

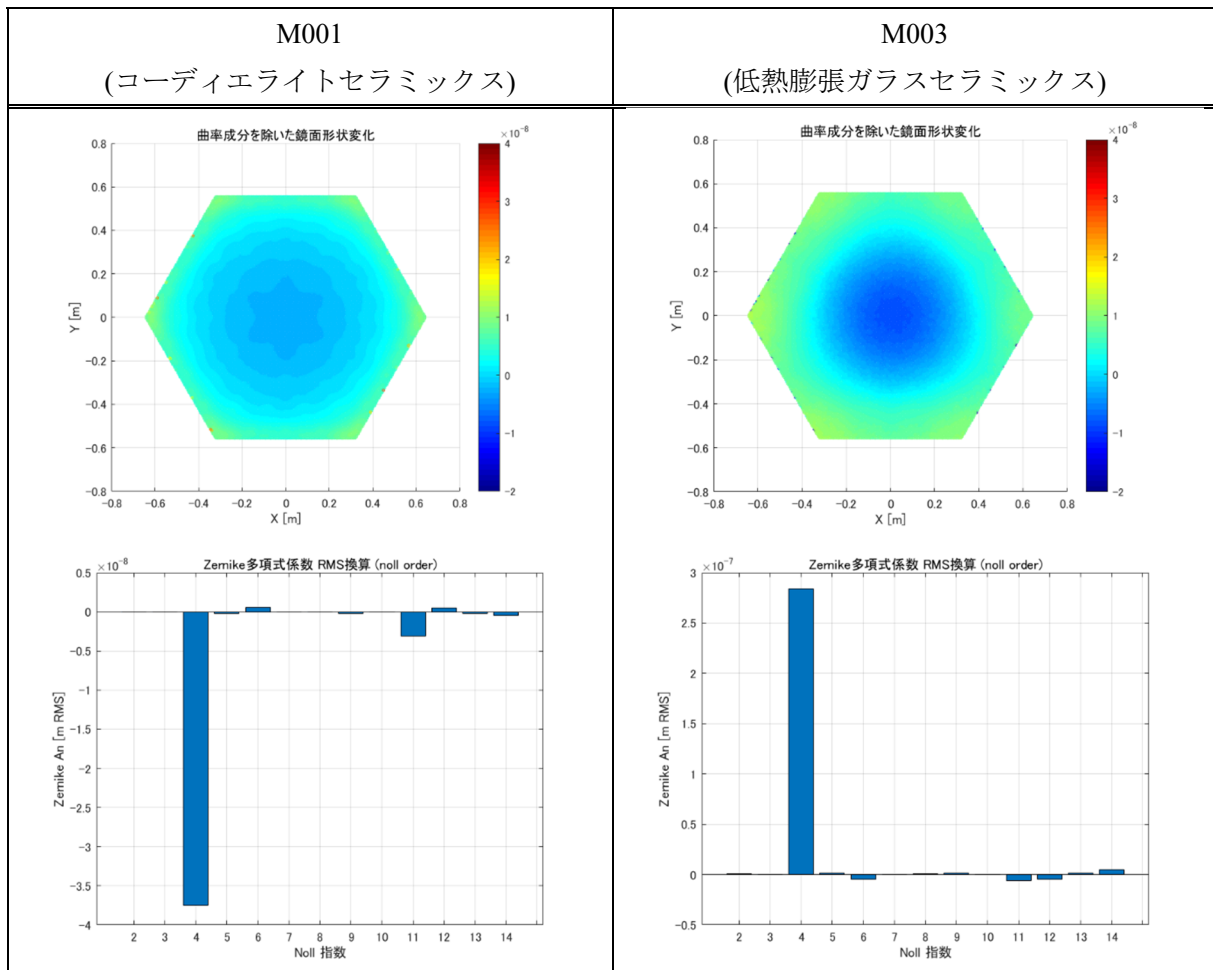
係数グラフは Noll 指数 1 のピストン(Z_0^0)を除く

表 4-16 Zernike 多項式解析による鏡面変形解析結果 (T004, 温度分布 光軸 5°C)



コンター図はピストン(Z_0^0), チルト(Z_1^{-1}), パン(Z_1^1), デフォーカス(Z_2^0)を除いた成分を示す
 係数グラフは Noll 指数 1 のピストン(Z_0^0)を除く

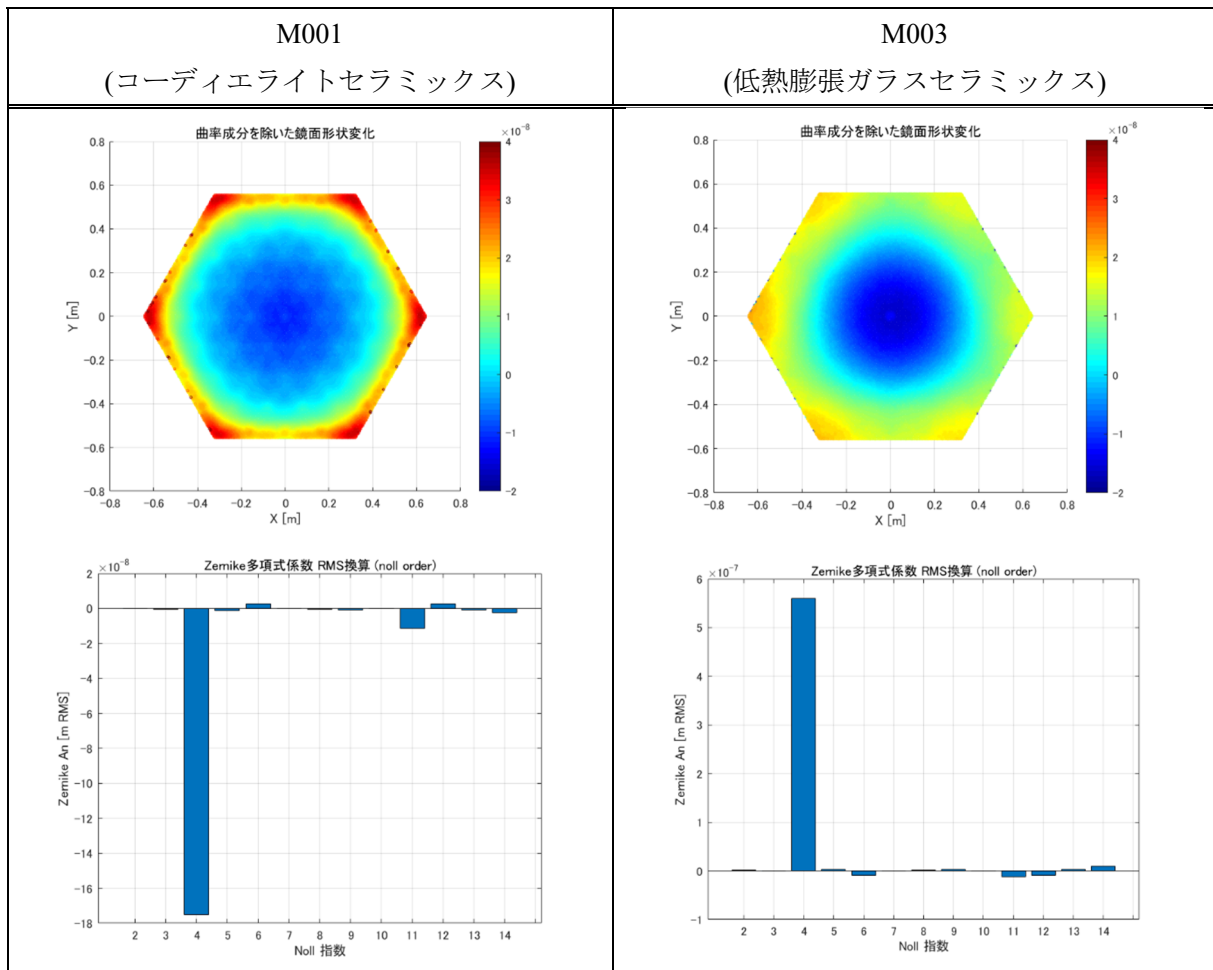
表 4-17 Zernike 多項式解析による鏡面変形解析結果 (T005, 温度分布 光軸 10°C)



コンター図はピストン(Z_0^0), チルト(Z_1^{-1}), パン(Z_1^+1), デフォーカス(Z_2^0)を除いた成分を示す

係数グラフは Noll 指数 1 のピストン(Z_0^0)を除く

表 4-18 Zernike 多項式解析による鏡面変形解析結果 (T006, 温度分布 光軸 20°C)



コンター図はピストン(Z_0^0), チルト(Z_1^{-1}), パン(Z_1^{+1}), デフォーカス(Z_2^0)を除いた成分を示す
 係数グラフは Noll 指数 1 のピストン(Z_0^0)を除く

表 4-19 熱変形解析によるデフォーカスを除く鏡面形状変形およびデフォーカスの大きさ
(面内方向分布, 単位: nm RMS)

Model	T001 (面内 5°C)		T002 (面内 10°C)		T003 (面内 20°C)	
	デフォーカス	鏡面形状変形(デフォーカス除く)	デフォーカス	鏡面形状変形(デフォーカス除く)	デフォーカス	鏡面形状変形(デフォーカス除く)
M001 (コーディエライト, H=130)	0.28	0.63	1.1	2.5	4.4	9.9
M003 (低熱膨張ガラスセラ ミックス, H=130)	0.06	0.66	0.14	1.33	0.42	2.73

表 4-20 熱変形解析によるデフォーカスを除く鏡面形状変形およびデフォーカスの大きさ
(光軸方向分布, 単位: nm RMS)

Model	T004 (光軸 5°C)		T005 (光軸 10°C)		T006 (光軸 20°C)	
	デフォーカス	鏡面形状変形(デフォーカス除く)	デフォーカス	鏡面形状変形(デフォーカス除く)	デフォーカス	鏡面形状変形(デフォーカス除く)
M001 (コーディエライト, H=130)	5.2	1.9	37	7.0	175	27
M003 (低熱膨張ガラスセラ ミックス, H=130)	141	7.8	284	15	560	29

4.6. まとめと考察

低熱膨張ガラスセラミックスとコーディエライトセラミックスについて、ミラー母材とした際の特性比較のために構造解析を行った。対象とした各有限要素モデルは母材の材料による差が明確に見えるよう素材以外は同一形状とし、支持構造はほぼ理想的なヒンジを持つバイポッドとした。また、コーディエライトセラミックスと低熱膨張ガラスセラミックスではおおむね比剛性が 1.5 倍程度異なるが、固有値解析や静変形解析においてはその差異をリブ高さによって幾何学的に補うことを想定し、事前検討を踏まえてリブ高さが 130mm、180mm の 2 形状に対して解析を行った。

固有値解析の結果、コーディエライトのリブ高さ 130mm と低熱膨張ガラスセラミックスのリブ高さ 180mm で類似する固有値となることが確認された。したがって、同じ固有振動数を実現しようとする、コーディエライトセラミックスのほうが軽量のミラーが実現可能といえる。

静荷重解析においても同様に比剛性が高い分、コーディエライトセラミックスのほうがより高さの低い軽量なリブで変形量が小さくなる。このことは、地上 1G での検証環境と軌道上 0G での形状の差異が小さくなることを意味し、軌道上での鏡面精度の向上に寄与するものと考えられる。また、光軸水平での干渉計測時に想定されるような、X、Y 方向に加速度をかけた場合はリブの変形に起因すると推定される鏡面の変形が生じた。このような変形はリブ高さが高いほど大きくなるため、リブを高くしても素材の比剛性の差を完全に補うことは難しいことを示しており、この点でも比剛性の高いコーディエライトセラミックスは優位となる。

静荷重に対する応力分布を確認すると、支持構造接着部近傍に応力は集中している。ミラー全体でのリブ幅には強度的には余裕があるため、将来的にはさらなる軽量化も期待できる。

最後に、熱変形解析では線膨張係数の温度依存性を加味することで、素材や温度ごとに独特の変形結果が得られた。コーディエライトセラミックスや低熱膨張ガラスセラミックスの熱変形量の検討においては温度依存性の考慮が重要である。ただし、どちらの材料も重力変形などと比較すると面内方向の熱変形量は非常に微小であり、結果的に素材間の線膨張係数の細かい差異は製品開発時の材料選択において決定的な要素とならない可能性がある。ただし、本資料では理想的な支持構造を想定しているため、詳細設計では熱変形の差異がより大きくなる可能性はある。その場合でも熱変形しないミラーとより大きく変形する外部構造との間に発生する熱応力の影響が想定されるため、より剛性の高いコーディエライトセラミックスの方が鏡面形状を維持する点で優位となることが期待される。

5. まとめ

本資料はコーディエライトセラミックスを望遠鏡の母材として適用した際の特性について、JAXA 研究開発部門にてこれまで調査、研究を行ってきた結果をまとめたものである。

JAXA 研究開発部門では 2010 年代中盤から、次世代の超高安定構造の変形計測に必要な安定した計測環境の実現に向けた研究を行ってきた。こうした中で、コーディエライトセラミックスが温度変化に対して高い形状安定性を持つこと、強度、剛性などの機械的特性に優れることなどが示された。これらの特徴は望遠鏡のミラー母材として必要な特性と一致する。特に機械的特性については、従来一般的に使用されてきた低熱膨張ガラスセラミックスを凌ぐ可能性も示唆されたことから、主にミラー母材の軽量化による革新的な大口径望遠鏡の実現を目的として一連の研究は実施されてきた。

第 2 章では、まず、コーディエライトセラミックスの弾性率、ポアソン比、密度、曲げ強度、線膨張係数などのミラー母材として設計に必要な材料物性値について、同一の試験者が、JIS や ISO 等の各種規格に則った同一の手順で、同時期に取得した結果についてまとめて示した。比較のため、従来から硝材として使用されている低熱膨張ガラスセラミックスの計測結果も示した。コーディエライトセラミックスは低熱膨張ガラスセラミックスに比べ、比剛性が 1.5 倍、同一研磨条件における高い曲げ強度、熱伝導率が 3 倍など、特に剛性や強度などの機械特性が優れていることが定量的に確認された。続けて、ミラーとして使用する際に必要な研磨性についても評価結果を示した。φ250mm 凹面放物面鏡等の試作評価にて、可視光望遠鏡として十分な精度まで研磨可能であること、サブアパーチャ工具による非球面加工も可能であることが実証された。さらには、支持構造への接合を想定した異種材料との接着性についても評価を行い、スーパーインバー合金との接合について実例を示した。加えて特性評価の内、特に曲げ強度、線膨張係数および放射線耐性の評価について、従来にない多くの知見を得ている。

第 3 章では、コーディエライトセラミックスによる軽量化ミラーの試作実績を紹介し、0.3m 級、0.7m 級、1.3m 級の軽量化ミラー母材の試作結果を示した。いずれのサイズでも、ミラーとして適用可能な母材製造に成功している。一方で、数多くの実績を持つ低熱膨張ガラスセラミックスと比較すると試作数は非常に限られており、製造条件の最適化など製造工程の安定化には、より多くの試作による知見の蓄積が必要である。

第 4 章では、コーディエライトセラミックスのミラー母材としての優位性を示すため、構造解析によるケーススタディの結果を示した。地上重力 (1G) 下での鏡面変形量は、比剛性に優れるコーディエライトセラミックスが小さく、剛性要求を満足するために必要なリブ高さを低くすることができるため軽量化への期待値が高いことが示された。熱変形による鏡面変化については、コーディエライトセラミックスのゼロクロス温度近傍ではコーディエライトセラミックスの優位性が見られるが、より広い温度帯で考えると低熱膨張ガラスセラミックスに優位性が見られる結果が示された。また、熱変形解析においては、線膨張係数の温度依存性を考慮することが重要である。ただし、熱変形による鏡面変化は 1G による変形量と比較すると非常に微小であることにも留意すべきである。

これらの検討結果をまとめると、コーディエライトセラミックスは宇宙用ミラーとして必要な特性を持ち、特に強度、剛性などの機械的特性に優れていることから、軽量化に対して強い要求が発生する大口径の宇宙用ミラー母材としての活用が期待される。ただし、線膨張係数の温度依存性については留意が必要である。コーディエライトセラミックスの線膨張係数のゼロクロス点は室温近辺に存在するため、

使用環境を室温近傍の狭い範囲で管理して使用することが重要といえる。

以上の研究成果が今後の革新的な大口径ミラーを用いたミッションの実現に繋がることを期待してまとめとする。

謝 辞

一連の研究開発のうち、0.3m 級、0.7m 級のセラミックスミラーの試作については、JAXA 研究開発部門が実施した支える研究「宇宙機機械系技術研究」の下、黒崎播磨株式会社との研究開発契約により実施され、1.3m 級の試作は先導する研究「静止軌道からの常時観測システム」の下、三菱電機株式会社との研究開発契約によりそれぞれ実施されました。非常に難易度の高い研究開発に対して、開発パートナーの方々には熱意をもって精力的に取り組んでいただきありがとうございました。開発に携わったすべての関係者に対して厚く御礼申し上げます。また、放射線照射にかかわる熱光学特性評価の一部は、QST 高崎研 TIARA の施設共用制度（課題番号 2020A-C14）の利用により実施されました。厚く御礼申し上げます。

参考文献

1. Warren J. Smith, Modern optical engineering, 4th edition, SPIE press, 2007.
2. 神谷友裕, 菅原潤, 水谷忠均, 安田進, 北本和也, 清水隆三, 超高安定アサーマル構造を目指したゼロ膨張セラミックスの適用について, 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2016-4461, 3H02, 2016 年 9 月.
3. 神谷友裕, 清水隆三, 高精度熱ひずみ評価試験設備の開発, 宇宙航空研究開発機構研究開発資料, JAXA-RM-16-004, 2017.
4. 神谷友裕, 水谷忠均, 宇宙望遠鏡に適用する低熱膨張セラミックスと低熱膨張ガラスの物性比較, 2017 年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, 2017 年 9 月, p195-196.
5. K. Kitamoto, T. Mizutani, Effect of surface condition on the bending strength of cordierite ceramics, Proc. SPIE 11451, Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation IV, 1145114, Dec 2020.
6. Jun Sugawara, Bumpei Mikashima, Tomohiro Kamiya, Polishing aspheric mirrors of zero-thermal expansion cordierite ceramics (NEXCERA) for space telescopes, Material Technologies and Applications to Optics, Structures, Components, and Sub-System III in SPIE Optics + Photonics, Proc. of SPIE Vol. 10372, Sep. 2017.
7. 菅原潤, 三ヶ島文丙, 神谷友裕, ゼロ熱膨張セラミックス(NEXCERA)の衛星用非球面ミラー加工技術の開発(第 1 報), 2017 年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, 2017 年 9 月, p75-76.
8. 北本和也, 草部将吾, 神谷友裕, 柳瀬恵一, 水谷忠均, 木村俊義, 宇宙望遠鏡支持構造における接着構造の検討, 第 61 回構造強度に関する講演会, 1A06, 2019 年 8 月.
9. 新報国製鉄(株) ホームページ, <https://www.shst.co.jp/product/teinetu>, 確認日 2022/11/19
10. Y. Fujii, T. Uno, S. Arika, K. Suehiro, S. Itakura, et. al., Experimental study of 3.6-meter segmented-aperture telescope for geostationary Earth observation satellite, Proc. SPIE 11852, International Conference on Space Optics, 118522G, 2021.
11. 水谷忠均, 神谷友裕, 藤井康隆, 佐藤世智, 木村俊義, 大型分割宇宙望遠鏡の研究開発, 第 63 回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2019-4727, 3Q06, 2019 年 11 月.
12. T. Kamiya, J. Suganuma, T. Mizutani, S. Yasuda, K. Kitamoto, "EARLY STUDY ON THE APPLICATION OF NEXCERA ULTRA LOW THERMAL EXPANSION CERAMIC TO SPACE TELESCOPES, International Conference on Space Optics, Biarritz, France, 2016.
13. T. Kamiya, T. Mizutani, "Study on polishing characteristics of cordierite ceramics for ultra-lightweight and thermally stable mirror applications", Proc. SPIE 10742, Optical Manufacturing and Testing XIII, 1074205, Sep 2018.
14. 神谷友裕, 水谷忠均, 極低熱膨張セラミックスを用いた超軽量高精度鏡面の開発, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2018-452351, 2J20, 2018.
15. T. Kamiya, T. Mizutani, Development of ultra-lightweight and thermally-stable cordierite ceramic mirrors, Proc. SPIE 10706, Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation III, 107060O, 2018.
16. 草部将吾, 北本和也, 神谷友裕, 柳瀬恵一, 嶋崎信吾, 井上愛理, 水谷忠均, 木村俊義, 70cm 級セラ

ミックス鏡の機械環境試験, 第 63 回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2019-4729, 3Q08, 2019 年 11 月.

17. 藤井康隆, 有木茂, 末廣晃也, 飯田英伸, 新井聡, 川成亮太, 太田哲二, 佐藤世智, 河野太郎, 柳瀬恵一, 安田進, 水谷忠均, 木村俊義, 静止地球観測向け大型分割鏡に関する試作状況, 第 64 回宇宙科学技術連合講演会講演集, オンライン会場, JSASS-2020-4097, 1H04, 2020.
18. 藤井康隆, 有木茂, 末廣晃也, 河野太郎, 柳瀬恵一, 佐藤世智, 安田進, 菅沼正洋, 水谷忠均, 木村俊義, 静止地球観測向け 1.3m 級セラミックス製分割鏡, および調整機構の試作評価, 第 65 回宇宙科学技術連合講演会講演集, オンライン会場, JSASS-2021-4147, 1J10, 2021.

付録

付録.A. ~ 付録.C.では 2.1 節の物性値評価のうち、曲げ強度および線膨張係数の評価手法、および、材料の放射線耐性に関する補足を追記する。これらの特性については、その評価の過程で、従来にない多くの知見を得ている。曲げ強度については、リング曲げ試験による評価を実施し、材料強度はその表面状態によって大きく変化することを示した。線膨張係数については、独自に開発したダブルパスマイケルソンレーザー干渉計による計測システムによる評価を実施した。コーディエライトセラミックスには室温付近に線膨張係数の符号が逆転するゼロクロス点があり、その近傍においてはガラスセラミックスよりも非常に低い値となる。ただし、より広い温度範囲でみると、ガラスセラミックスのほうが低熱膨張特性を維持している。このことから、コーディエライトセラミックスをミラー母材とする場合、ゼロクロス点近傍に温度を精密に管理することが重要となる。放射線耐性について、静止軌道 20 年相当分の照射を行い、材料の機械的特性（弾性率、線膨張係数）や熱光学特性の変化について評価を実施した。その結果、コーディエライトセラミックスは低熱膨張ガラスセラミックスと比較して同等以上の耐性をもつ結果が得られた。こうした点について、計測手順や、取得データ、解析結果などの詳細を付録として以下に示す。

付録.A. 曲げ強度

脆性材料の強度試験は矩形試験片による 3 点曲げ、4 点曲げにて評価されることが多いが、これらの試験方法では破壊起点が供試体端部など真に想定応力が負荷されている部位でないことがある。本資料の曲げ強度評価においてはそうした懸念のない板状試験片によるリング曲げ試験（ISO EN 1288-5 Loading device R45, 試験片長さ 100mm 正方形）を適用し、曲げ強度の評価を実施した。また、脆性材料についてはその表面状態により大きく結果が変わるため、3 つの表面状態（焼成面（As-fired）、精研削面（Ground）、研磨面（Polished））における破壊強度を計測した。リング曲げ試験による曲げ強度 σ_{Ring} は式(A-1)より算出した。

$$\sigma_{Ring} = \frac{3(1+\nu)}{2\pi} \left[\frac{(1-\nu)}{(1+\nu)} \frac{R_l^2 - R_s^2}{2R_m^2} + \ln \left(\frac{R_l}{R_s} \right) \right] \frac{P}{h^2} \quad (\text{A-1})$$

$$R_m = \frac{1 + \sqrt{2}L}{2} \frac{L}{2}$$

P は破壊荷重[N], h は試験片厚[mm], L は試験片外形[mm], ν はポアソン比, R_m は試験片等価外径[mm], R_l は荷重リングの半径[mm], R_s は支持リングの半径[mm]である。今回、リング曲げ試験治具の荷重リング半径 R_l は 9mm, 支持リング半径 R_s は 45mm のものを使用している。リング曲げ試験装置の概要を図 A-1 に示す。

なお、リング曲げ試験の試験結果評価には実施当時もっとも確からしいと考えられていた表 A-1 によるポアソン比が使用されている。その後、誤差評価などにより最も確からしい材料物性値が更新されたため先に示した表 2-2 の値とは若干異なるが、評価結果に大きな影響を与えるものではない。

曲げ強度評価に用いた試験片は各材料メーカーにてリング曲げ試験片形状に素材を整形し、その後試験条件に合わせた表面状態に加工を実施した。焼成面（As-fired）についてはセラミックス系素材のみの規定であり、素材焼成時のままを意図した条件である。精研削面は光学部品の加工メーカーにてロータ

リー平面研削を同一加工条件にて指定の面粗度 (Ra 1.6 μ m 以下) となるように上下面とも加工したものであり、研磨面についてはすべて両面パッド研磨により指定の面粗度 (Ra 5nm 以下) となるように加工したものである。リング曲げ試験片サンプルの代表的な写真を図 A-2～図 A-4 に示す。また、使用した試験片の表面粗さ、大きさ、厚み、サンプル数などを表 A-2 に示す。

次に試験によって得られた各試験片の破壊応力を統計確率の観点から整理した。破壊確率分布は脆性材料であることからワイブル分布を用い、累積破壊確率の評価方法はメジアンランク法を用いて評価した。具体的には、破壊強度のデータの順番 i 、データ総数 n を用いて式(A-2)^{A1)}により計算されている。

$$F(\sigma_i) = \frac{i-0.3}{n+0.4} \quad (\text{A-2})$$

また、2母数ワイブル分布による破壊確率 $F_{2w}(\sigma)$ は

$$F_{2w}(\sigma) = 1 - e^{-\left(\frac{\sigma}{\sigma_c}\right)^\lambda} \quad (\text{A-3})$$

3母数ワイブル分布による破壊確率 $F_{3w}(\sigma)$ は

$$F_{3w}(\sigma) = 1 - e^{-\left(\frac{\sigma-\sigma_T}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{A-4})$$

と仮定する。ここで2母数ワイブル分布仮定における λ はワイブル係数、 σ_c は特性パラメータ、3母数ワイブル分布仮定における β は形状パラメータ、 η はスケールパラメータ、 σ_T は位置パラメータである。これらのパラメータについては、材料試験の結果から最尤法により推定した。なお、研磨面のZERODURについては、位置パラメータが負となってしまう3母数ワイブル分布に適合する適切なパラメータを得ることができなかった。原因としては試験結果に複数の破壊要因が混在している可能性が考えられる。

解析を行った結果を図 A-5～図 A-8、表 A-3～表 A-5 に示す。

試験結果のうち、CO720 の研削面およびZERODUR の研磨面については、うまく結果が収束せず、有効な3パラメータを取得することができていない。

2つのコーディエライトセラミックス CD107 および CO720 は焼き肌面の λ が研削面、研磨面よりも顕著に小さい結果となっている。一方でコーディエライトセラミックスの特性応力 σ_T は100MPaを超えており、表面を研磨するほどより強くなる。研削のCO720だけ他と異なるトレンドが見られるが、これは試料製作時に表面直下、近傍に小さな損傷が残ってしまったことによる影響と考えられる。今回、各試料は加工条件を同一として設定したため、各試料の仕上がりは必ずしも素材に最適化されていない。表 A-2 にて CO720 の研削面のみ粗さが異なるのもこれに関連するものと推定される。コーディエライトセラミックスの研磨面については破壊応力のばらつきも小さく、累積破壊確率 0.1%の破壊応力が CD107、CO720 とともに100MPaを超える結果となっている。

コーディエライトセラミックスを含む脆性材料は評定応力を受ける範囲に存在する欠陥を起点として破壊が始まるため、応力を受ける面積が広がるほどより大きな欠陥が存在する確率が上がり低い応力で破壊する。今回の0.1%累積破壊確率の応力はリング曲げ試験片での結果であり、実際の評価については、応力の作用範囲がリング曲げ試験時の有効面積よりも狭いことを確認するか、より広範である場合は作用範囲の影響について換算の上、評価を行う必要がある。換算については、表面に存在するクラックを起点とし表面積の比率で換算する考え方と、内部に存在する欠陥を起点として体積の比率で換算す

る考え方があるが、一例として表面積で換算した場合のスケールファクタを式(A-5)に示す。

$$f_A = \frac{\sigma_{Ave1}}{\sigma_{Ave2}} = \left(\frac{A_{eff2}}{A_{eff1}} \right)^{\frac{1}{\lambda}} \quad (\text{A-5})$$

A_{eff1}, A_{eff2} : 有効面積 [mm²]
 $\sigma_{Ave1}, \sigma_{Ave2}$: 平均強度 [MPa]
 λ : ワイブル係数

また、リング曲げ試験の有効評価面積は式(A-6)により求められる^{A2)}。

$$A_{eff_ring} = \frac{\pi}{2} D_l^2 \left\{ 1 + \left[\frac{44(1+\nu)}{3(1+\lambda)} \right] \left[\frac{5+\lambda}{2+\lambda} \right] \left(\frac{D_s - D_l}{D_s D_m} \right)^2 \left[\frac{2D_m^2(1+\nu) + (D_s - D_l)^2(1-\nu)}{(3+\nu)(1+3\nu)} \right] \right\} \quad (\text{A-6})$$

$$D_m = \frac{1 + \sqrt{2} L}{2} \frac{L}{2}$$

A_{eff_ring} : リング曲げ試験による有効面積 [mm²]
 λ : ワイブル係数
 ν : ポアソン比
 L : 試験片外形 [mm]
 D_m : 試験片等価外径 [mm]
 D_l : 荷重リングの外径 [mm]
 D_s : 支持リングの外径 [mm]

以上から設計強度 $\sigma_{B.C.}$ を求める場合は式(A-7)の通り計算することができる。

$$f_A = \left(\frac{A_{Load}}{A_{TEST}} \right)^{\frac{1}{\lambda}}$$

$$\sigma_{B.C.} = \frac{\sigma_{0.1}}{f_A} \quad (\text{A-7})$$

A_{Load} : 評定となる荷重の作用する有効面積 [mm²]
 A_{TEST} : 試験時の有効面積 [mm²]

一例として、荷重を受ける面積が 1m² の状況下において 2 パラメータワイブル係数推定による 0.1%累積破壊確率強度を設計基準とした場合の設計強度の計算例を表 A-6 に示す。表 A-6 は荷重を受ける面積が 1m² の場合に限って有効であり、その他の場合には改めて計算が必要である。

最後に CD107 と CO720 について今回のリング曲げ試験結果をもとに、2 パラメータワイブル係数推定の結果から荷重面積(mm²)と累積破壊確率 0.1%基準設計応力(MPa)の関係を表したチャートを図 A-9 および図 A-10 に示す。

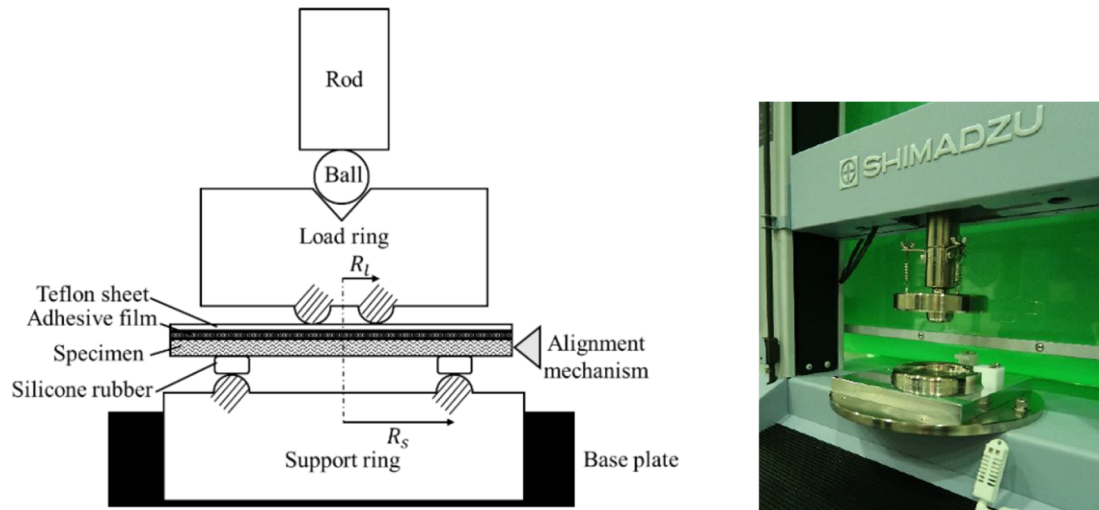


図 A-1 リング曲げ試験装置概要図 ^{A3)}

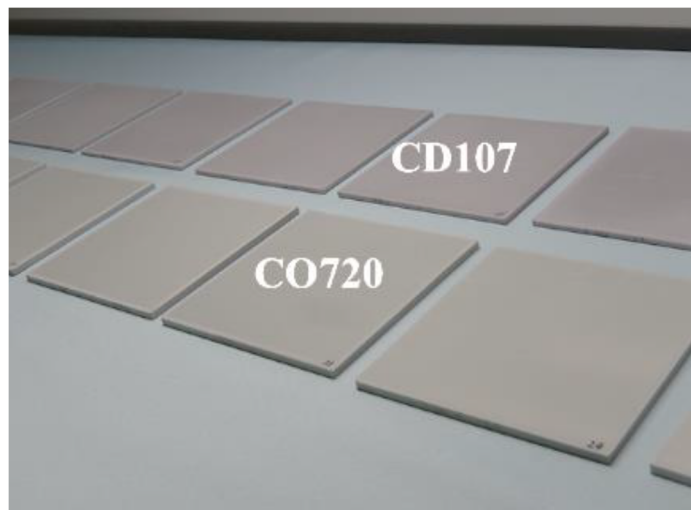


図 A-2 リング曲げ試験片（焼成面）^{A4)}

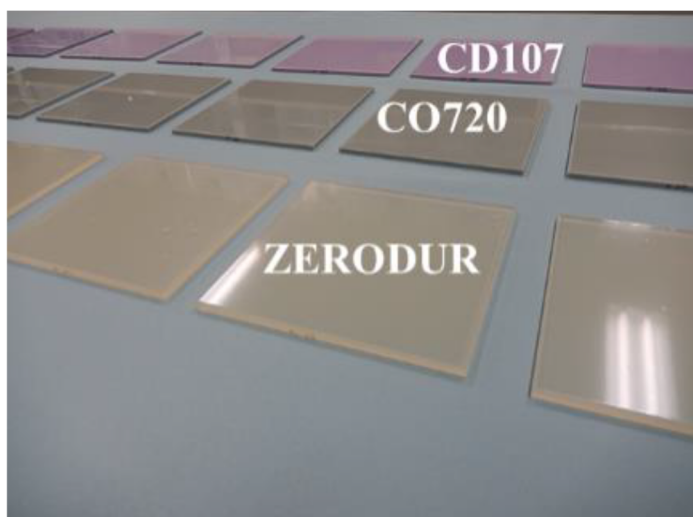


図 A-3 リング曲げ試験片（精研削面）^{A4)}

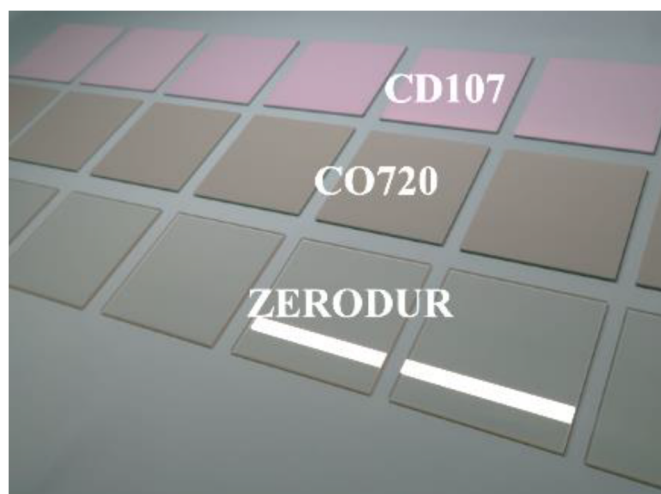


図 A-4 リング曲げ試験片（研磨面）^{A4)}

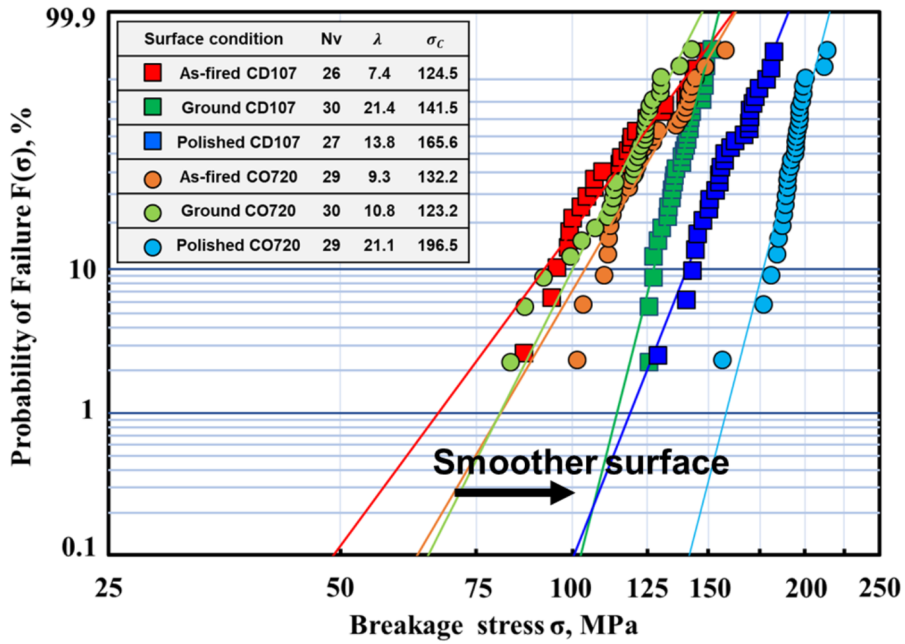


図 A-5 2母数ワイブル分布によるコーディエライトセラミックスの曲げ強度評価^{A4)}

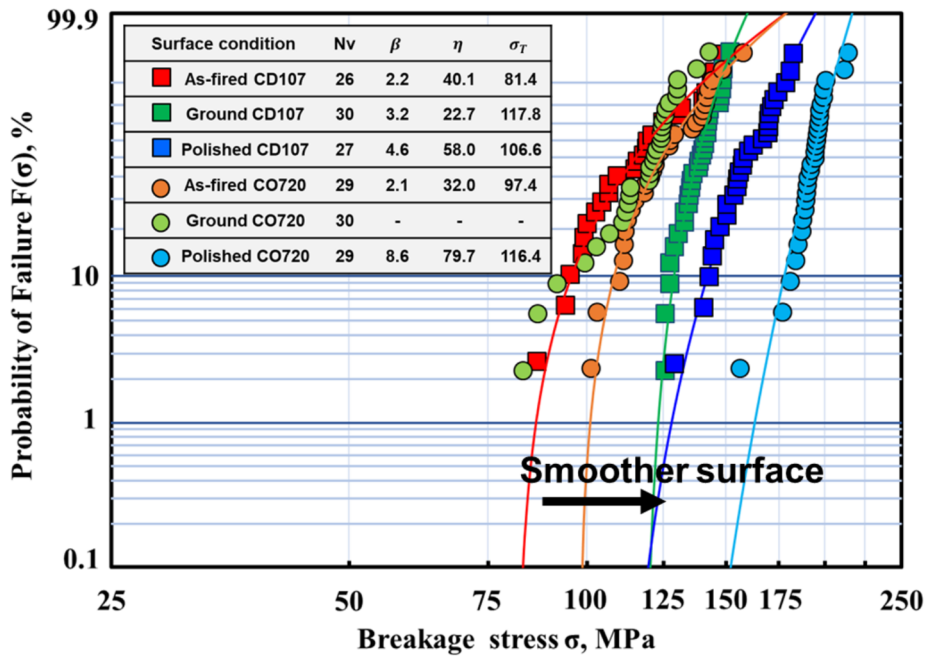


図 A-6 3母数ワイブル分布によるコーディエライトセラミックスの曲げ強度評価

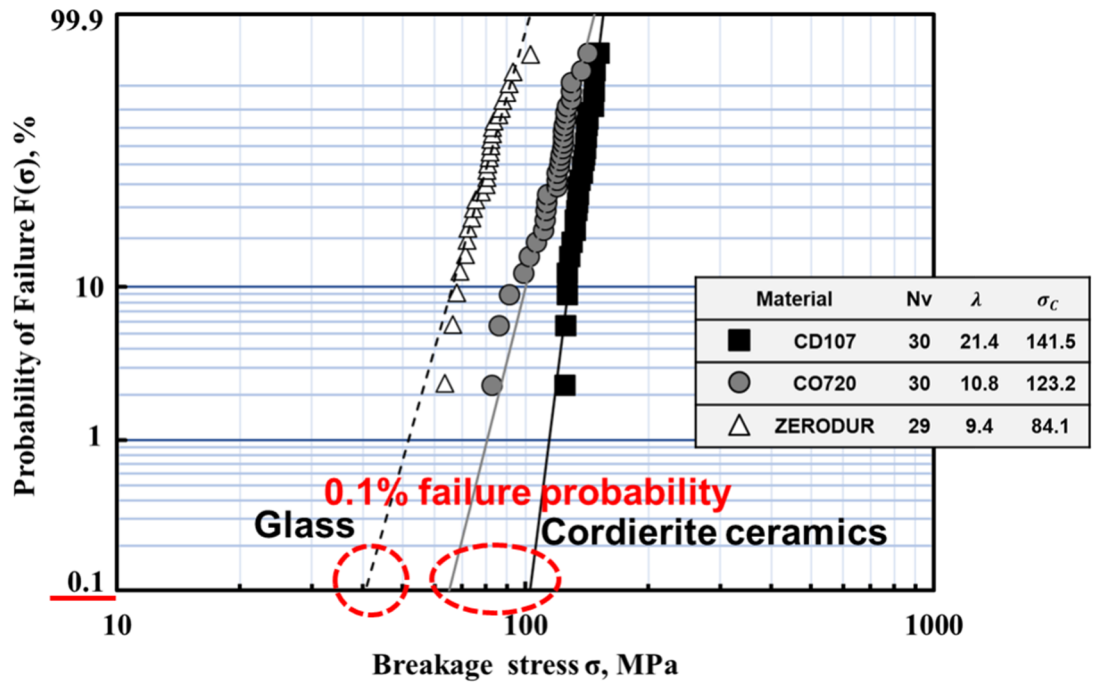


図 A-7 コーディエライトセラミックスと低熱膨張ガラスセラミックスの強度比較（研削面）^{A4)}

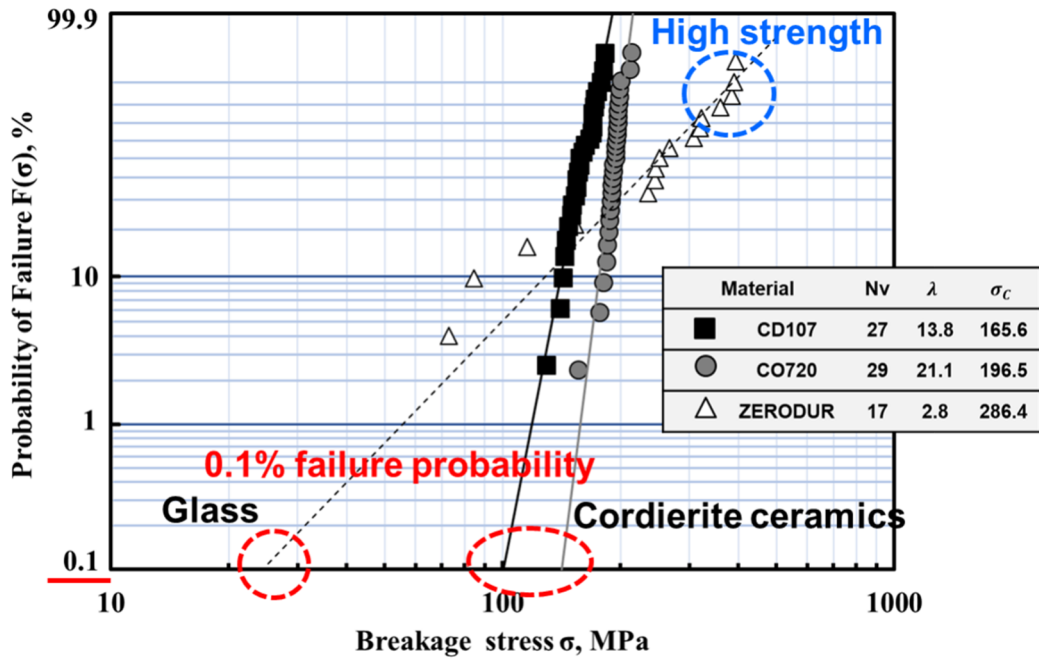


図 A-8 コーディエライトセラミックスと低熱膨張ガラスセラミックスの強度比較（研磨面）^{A4)}

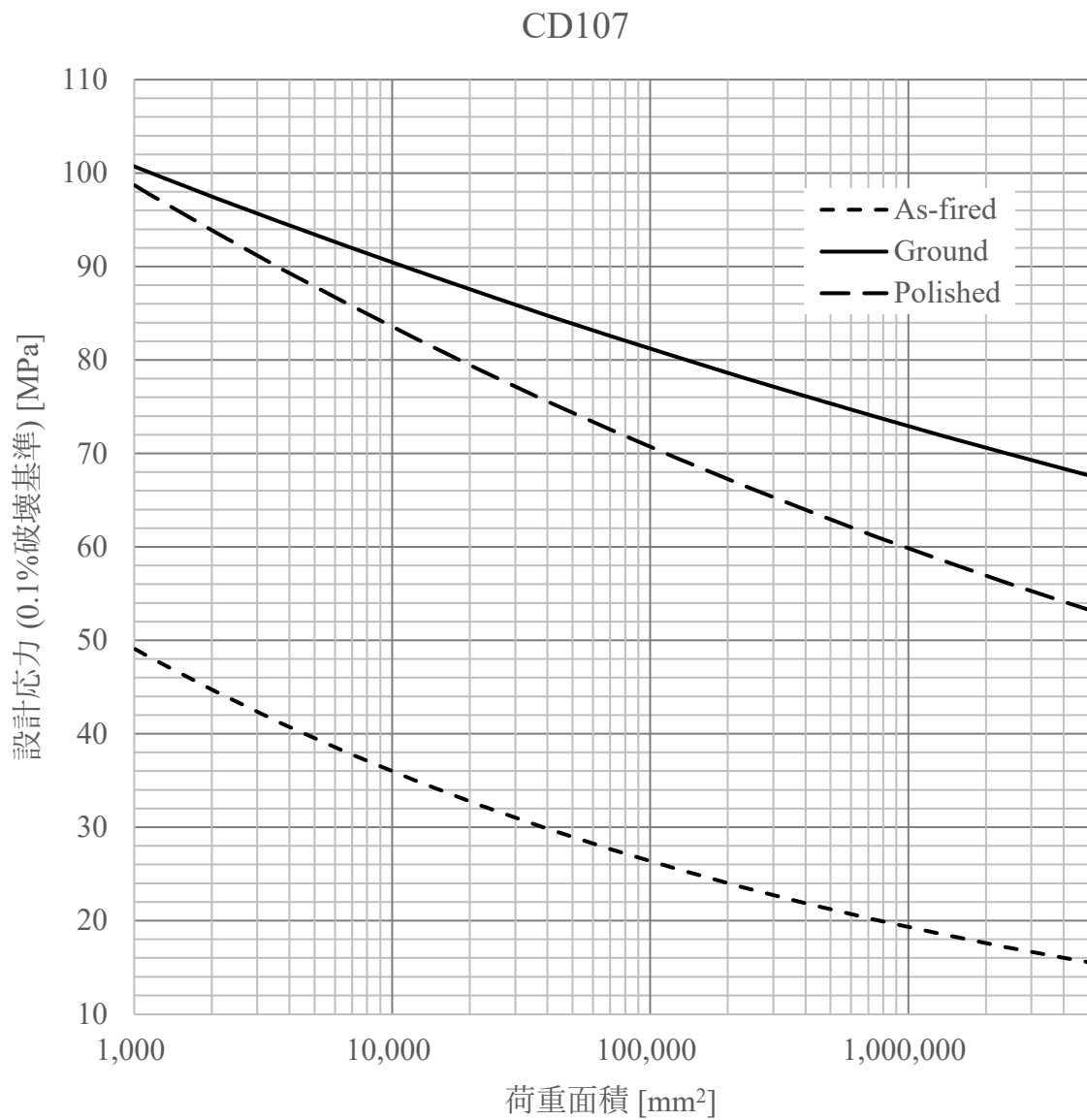


図 A-9 CD107 の荷重面積と設計応力(累積破壊確率 0.1%基準)の関係

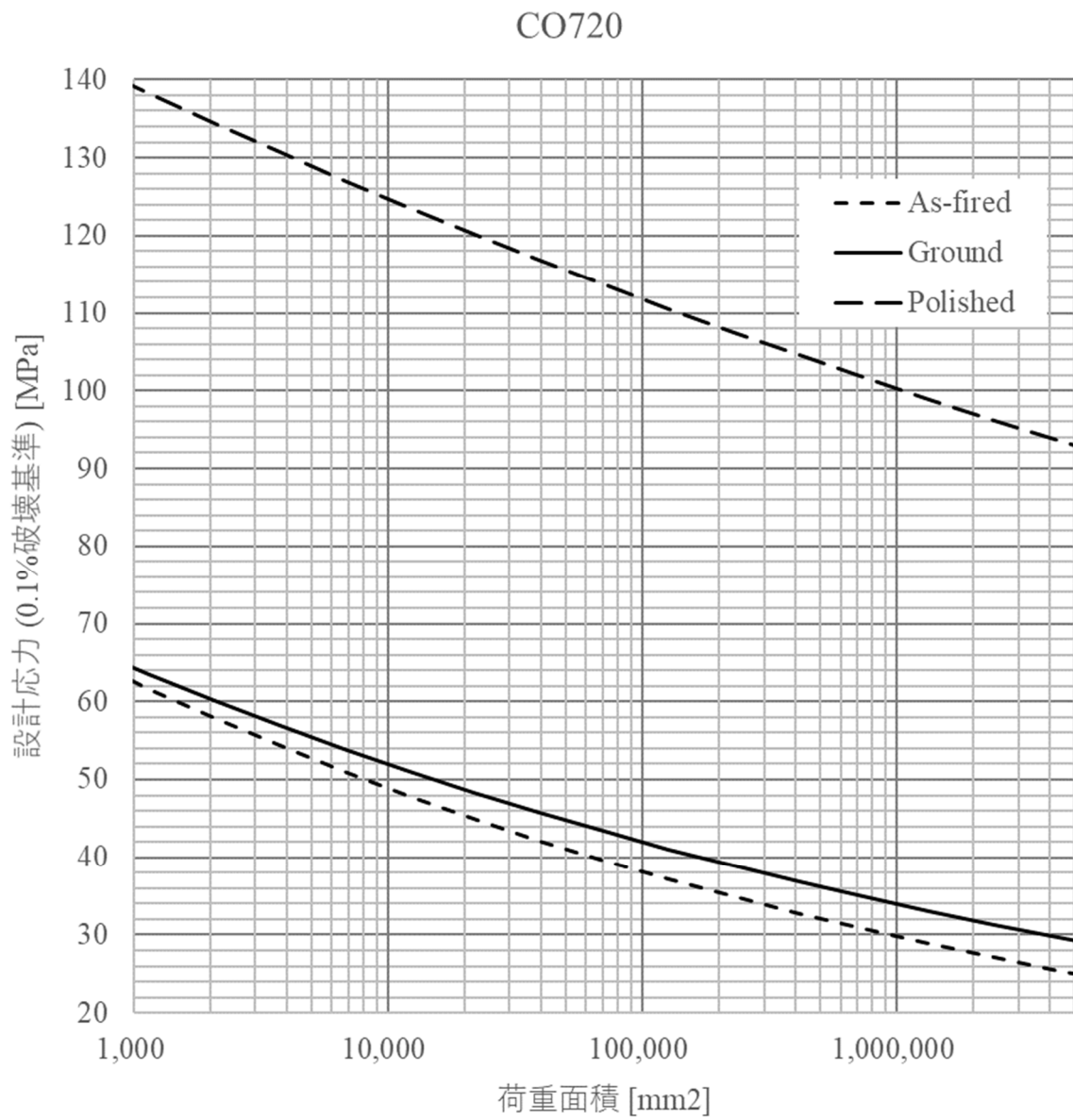


図 A-10 CO720 の荷重面積と設計応力(累積破壊確率 0.1%基準)の関係

表 A-1 リング曲げ試験結果の評価に使用した各材料の物性値^{A4)}

Material type	Ceramics		Glass
	NEXCERA™ CD107	CO720	ZERODUR® Class 0
Manufacturer	KROSAKI HARIMA	KYOCERA	SCHOTT
Material composition	Cordierite (2MgO-2Al ₂ O ₃ -5SiO ₂) ceramic		Lithium aluminum silicate glass-ceramic
Young's modulus, E GPa	140	140	89
Poisson's ratio, ν	0.29	0.28	0.22
Bulk density, ρ g/mm ³	2.58	2.55	2.54
Coefficient of thermal expansion (CTE) at 23 ± 5°C, α ppm/K	0.04 ± 0.05	0.02 ± 0.05	0.05 ± 0.01
Thermal conductivity, k W/m·K	4.68	4.68	1.52

表 A-2 試験供試体 一覧^{A4)}

	Surface condition	引張面表面粗さ	供試体サイズ (mm)	N
CD107	As-fired	Ra 1.2μm	100 x 100 x t3	30
	Ground	Ra 0.4μm	100 x 100 x t3	30
	Polished	Ra 3.2 nm	100 x 100 x t3	30
CO720	As-fired	Ra 2.6μm	100 x 100 x t4	30
	Ground	Ra 0.7μm	100 x 100 x t3	30
	Polished	Ra 2.4 nm	100 x 100 x t3	30
ZERODUR	Ground	Ra 0.4μm	100 x 100 x t3	30
	Polished	Ra 1.9 nm	100 x 100 x t3	30

表 A-3 各表面でのリング曲げ試験結果^{A3)}

	Surface condition	有効 サンプル数	最低 破壊応力 (MPa)	平均 破壊応力 (MPa)	最高 破壊応力 (MPa)
CD107	As-fired	26	86.4	116.9	148.8
	Ground	30	125.4	138.1	151.6
	Polished	27	129.0	159.5	182.2
CO720	As-fired	29	101.2	125.7	157.5
	Ground	30	82.9	117.5	142.5
	Polished	29	156.2	192.0	213.7
ZERODUR	Ground	29	63.4	80.1	103.0
	Polished	17	72.8	254.9	393.4

表 A-4 各表面でのリング曲げ試験結果からの2パラメータワイブル係数推定結果 A3)

	Surface condition	2パラメータワイブル係数		
		λ	σ_c	$\sigma_{0.1}$
CD107	As-fired	7.4	124.5	48.7
	Ground	21.4	141.5	102.5
	Polished	13.8	165.6	100.4
CO720	As-fired	9.3	132.2	63.0
	Ground	10.8	123.2	65.1
	Polished	21.1	196.5	141.6
ZERODUR	Ground	9.4	84.1	40.2
	Polished	2.8	286.4	24.9

表 A-5 各表面でのリング曲げ試験結果からの3パラメータワイブル係数推定結果 A3)

	Surface condition	3パラメータワイブル係数			
		β	η	σ_T	$\sigma_{0.1}$
CD107	As-fired	2.19	40.1	81.4	83.1
	Ground	3.17	22.7	117.8	120.4
	Polished	4.61	58.0	106.6	119.6
CO720	As-fired	2.08	32.0	97.4	98.6
	Ground	-	-	-	-
	Polished	8.56	79.7	116.4	152.0
ZERODUR	Ground	2.57	23.3	59.4	61.0
	Polished	-	-	-	-

$\sigma_{0.1}$: 試験サンプルでの累積破壊確率 0.1% の破壊応力

表 A-6 荷重面積 1m²での累積破壊確率 0.1%を基準とした設計強度計算例

	Surface condition	ワイブル係数	ポアソン比	リング曲げ有効面積	面積によるスケールファクタ	設計強度 *0.1%破壊確率基準
		λ	ν	$A_{\text{eff_ring}} (\text{mm}^2)$	f_A	$\sigma_{B,C} (\text{MPa})$
CD107	As-fired	7.4	0.31	1063.07	2.52	19.3
	Ground	21.4	0.31	686.66	1.41	72.9
	Polished	13.8	0.31	792.62	1.68	59.8
CO720	As-fired	9.3	0.31	942.47	2.12	29.8
	Ground	10.8	0.31	878.05	1.92	33.9
	Polished	21.1	0.31	689.34	1.41	100.3

付録.A. 参考文献

- A1. 酒井達雄, 田中道七, 機械・構造物の信頼性設計 6. 母数推定の統計的手法, 材料 31 巻 348 号, 1982, pp. 941-947.
- A2. Jain Rahul, Effective area and effective volume calculations for ceramic test specimens, PhD Thesis, Cleveland State Univ., 2008, p83.
- A3. K. Kitamoto, T. Mizutani, Effect of surface condition on the bending strength of cordierite ceramics, Proc. SPIE 11451, Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation IV, 1145114, Dec 2020.
- A4. 北本和也, 水谷忠均, 宇宙望遠鏡に適用する低熱膨張セラミックスの曲げ強度について, 第 65 回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2021-4146, 1J09, 2021 年 11 月.

付録 B. 線膨張係数評価

線膨張係数 (CTE) については JIS R 3251 に基づいた、ダブルパスマイケルソンレーザー干渉計によるシステムにより計測が実施されている^{B1)}。計測は 0°C から 50°C まで、真空環境下のチャンバー内にて実施された。計測の概念図を図 B-1 に示す。サンプルは長さ 12mm、断面を 6mm 角の正方形に加工した。サンプルの両端は半径 6mm の球面に表面粗さ 1.6 μm Ra のところまで加工されており、これによって平行度誤差の影響を最小限に抑えられるようになっている。本装置では併せて温度コントロールについても非常に高い精度で行えるようになっており、おおよそ $0.01 \times 10^{-6}/\text{K}$ の精度で CTE を計測することが可能である。

本装置により、コーディエライトセラミックス材料である CD107, CO720 およびガラスセラミックス ZERODUR などを含む従来よく使用されている材料の熱膨張係数の温度依存性を計測した結果を改めて図 B-2 に示す。また、より直接的な各物質の基準温度(25°C)からの伸び率($\Delta L/L$)について図 B-3 に示す。コーディエライトセラミックス材料の CTE のゼロクロス点は素材によって 19~21°C にあり、その近傍の温度においては温度に対する形状安定性が極めて高い。

最後に図 B-2, 図 B-3 のプロットに示すもののうちコーディエライトセラミックス系材料の $\Delta L/L$ および CTE を数値データにて表 B-1 に示す。

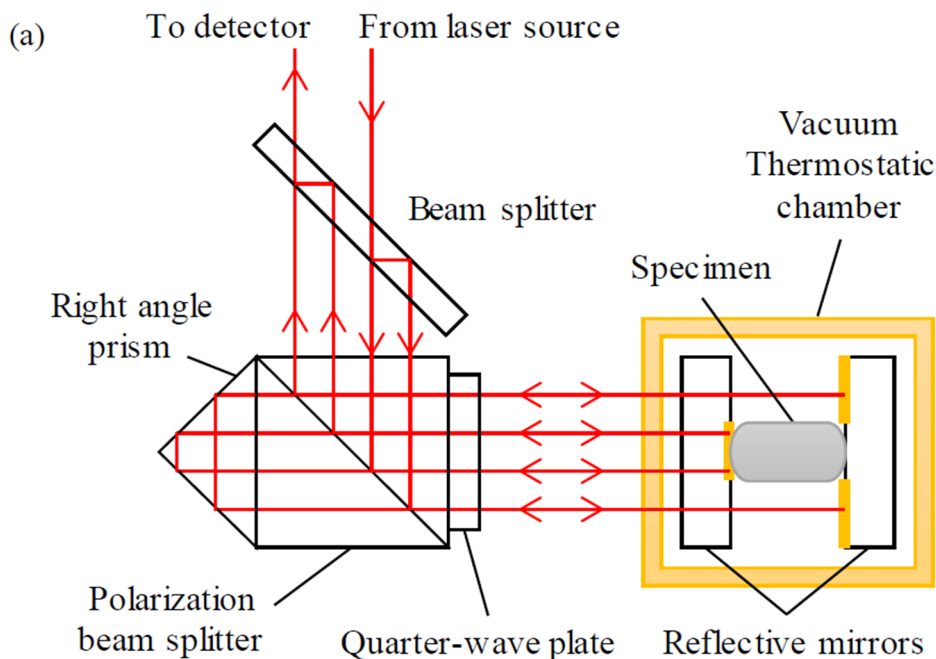


図 B-1 線膨張計測の概念図^{B1)}

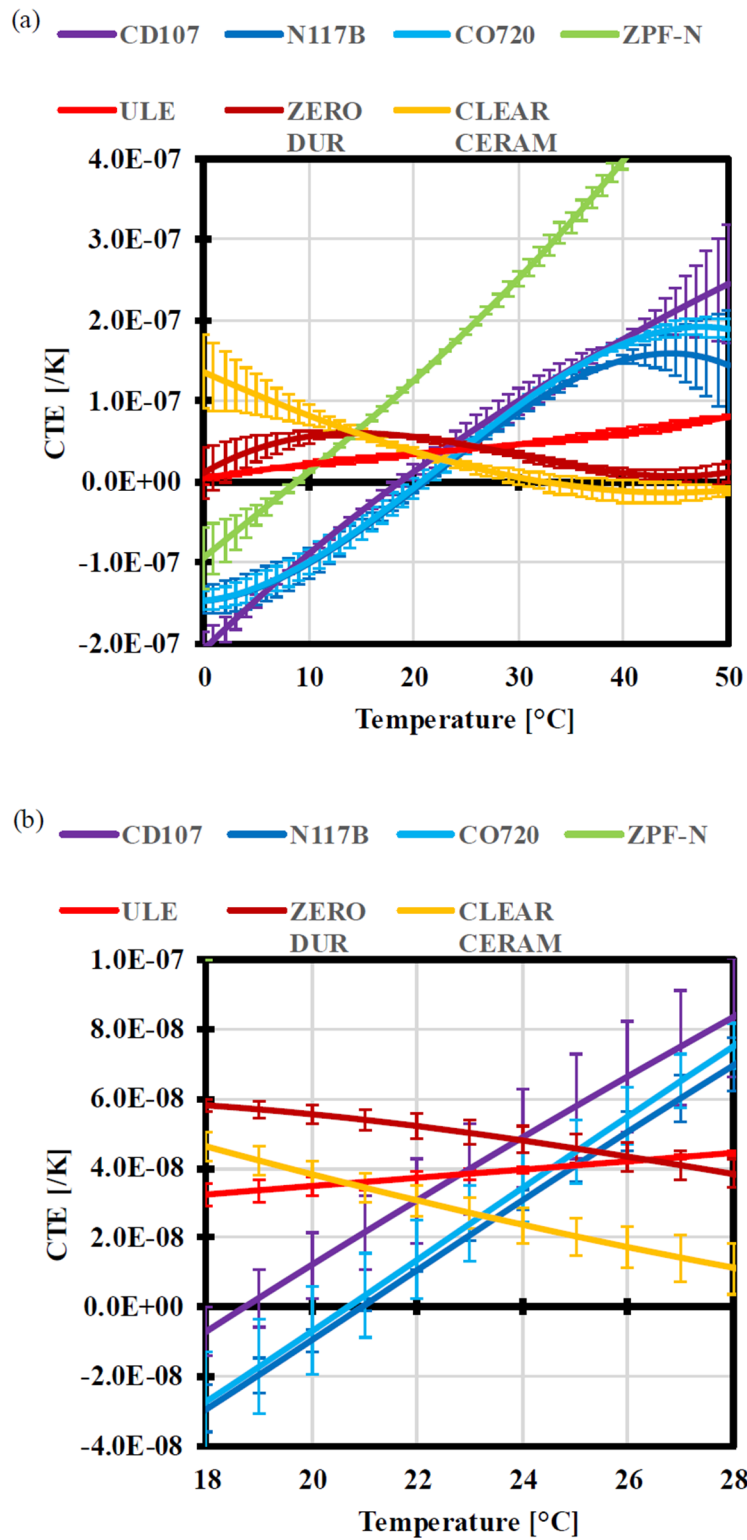


図 B-2 CTE の温度依存性. エラーバーは、複数サンプルによる結果のばらつきの範囲を表す.
 (a)が 0°Cから 50°Cの範囲で、(b)が 18°Cから 28°Cの範囲の拡大 ^{B1)}

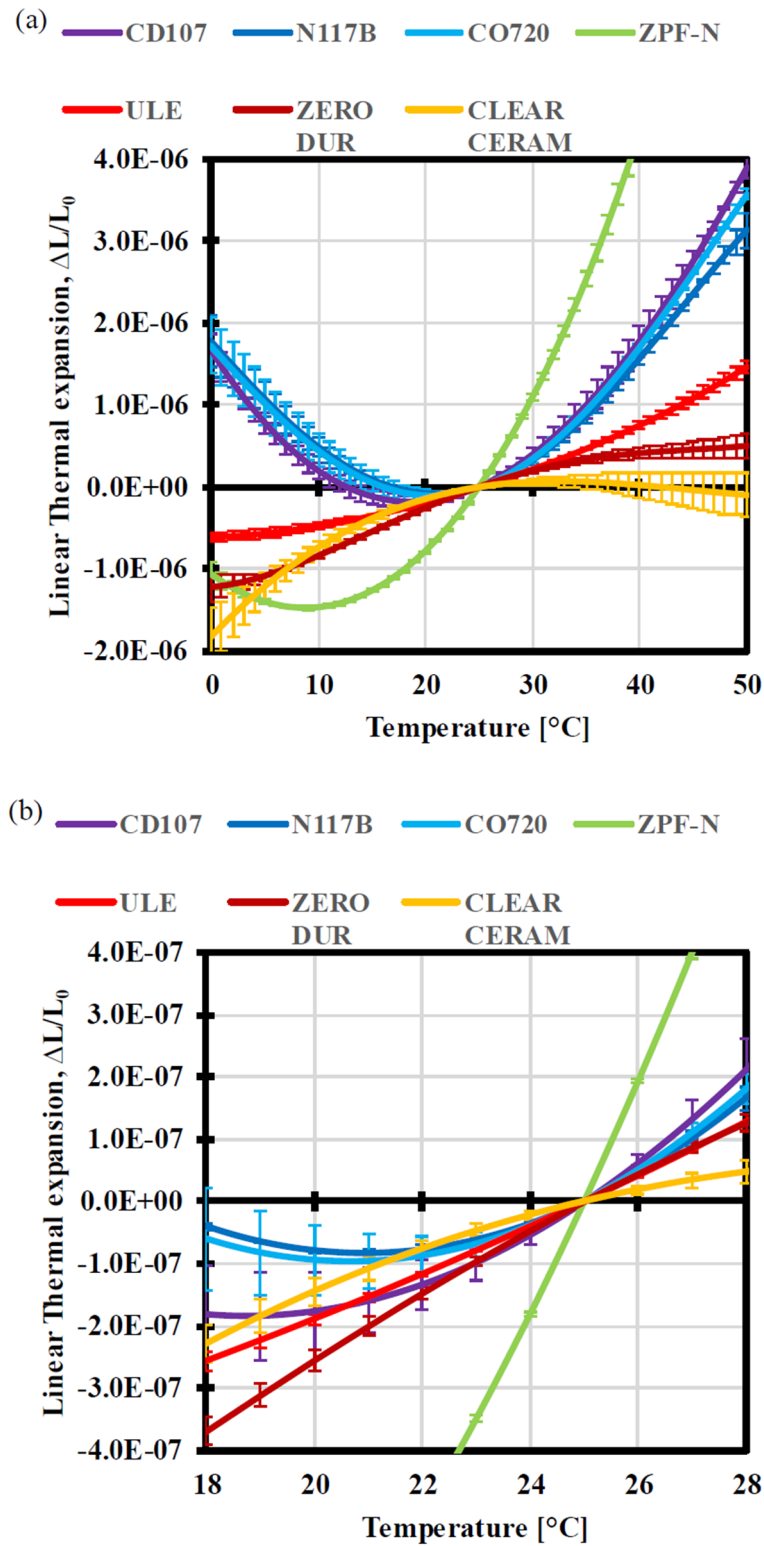


図 B-3 25°Cを基準とした伸び率 $\Delta L/L_0$ 。エラーバーは各物質の複数計測によるばらつき範囲を表す。
(a)は0°Cから50°C, (b)は18°Cから28°C^{B1)}

表 B-1 コーディエライトセラミックス系材料の $\Delta L/L$ および CTE の計測結果

温度(°C)	$\Delta L/L$ (25°C基準)			Coefficient of thermal expansion (CTE)		
	CD107	N117B	CO720	CD107	N117B	CO720
0	1.68×10^{-6}	1.78×10^{-6}	1.73×10^{-6}	-2.08×10^{-7}	-1.47×10^{-7}	-1.46×10^{-7}
10	2.01×10^{-7}	4.91×10^{-7}	4.55×10^{-7}	-8.98×10^{-8}	-1.00×10^{-7}	-9.85×10^{-8}
18	-1.80×10^{-7}	-4.01×10^{-8}	-6.05×10^{-8}	-7.13×10^{-9}	-2.93×10^{-8}	-2.71×10^{-8}
20	-1.75×10^{-7}	-7.89×10^{-8}	-9.45×10^{-8}	1.20×10^{-8}	-9.39×10^{-9}	-6.86×10^{-9}
22	-1.33×10^{-7}	-7.75×10^{-8}	-8.77×10^{-8}	3.06×10^{-8}	1.08×10^{-8}	1.37×10^{-8}
24	-5.32×10^{-8}	-3.58×10^{-8}	-3.96×10^{-8}	4.87×10^{-8}	3.09×10^{-8}	3.44×10^{-8}
26	6.19×10^{-8}	4.57×10^{-8}	4.99×10^{-8}	6.63×10^{-8}	5.06×10^{-8}	5.50×10^{-8}
28	2.12×10^{-7}	1.66×10^{-7}	1.80×10^{-7}	8.34×10^{-8}	6.97×10^{-8}	7.51×10^{-8}
30	3.95×10^{-7}	3.24×10^{-7}	3.50×10^{-7}	9.99×10^{-8}	8.77×10^{-8}	9.45×10^{-8}
40	1.79×10^{-6}	1.57×10^{-6}	1.71×10^{-6}	1.77×10^{-7}	1.52×10^{-7}	1.71×10^{-7}
50	3.90×10^{-6}	3.13×10^{-6}	3.58×10^{-6}	2.45×10^{-7}	1.46×10^{-7}	1.89×10^{-7}

付録.B. 参考文献

- B1. Tomohiro Kamiya, Tadahito Mizutani, Comparison of material properties between ultra low thermal expansion ceramics and conventional low thermal expansion glass, Proc. of SPIE, Vol. 10372 1037208-1, Sep. 2017.

付録. C. 放射線耐性

C.1 機械的特性の放射線耐性

コーディエライトセラミックスを宇宙用ミラー母材として使用するためには軌道上で受ける放射線に対しても耐性を有することが重要である。そこで地上で計測された機械的特性、特に線膨張係数と弾性率が軌道上で長期間にわたり放射線にさらされた後でも維持できるかについて検証を行った(C1),C2),C3),C4),C5)。検証に際しては照射レートを変えるため、電子線照射試験とガンマ線照射試験の2種類の試験を実施した。電子線照射試験においては10MeVの電子を6.08MGy/hの照射レートで静止軌道20年相当分のフルエンスまで照射している。ガンマ線照射試験ではコバルト60を線源として、照射レートは電子線照射試験から3桁少ない 5.79×10^{-3} MGy/hとした。こちらも静止軌道20年相当分までの電子線を照射した。試験サンプルはコーディエライトセラミックス2種(CD107, CO720)および、比較用に低熱膨張ガラスセラミックス3種(ZERODUR, CLEARCERAM, ULE)とした。線膨張係数についての電子線照射試験の結果を図C-1に、ガンマ線照射試験の結果を図C-2に示す。また、弾性率に関わる電子線照射試験の結果を図C-3に、ガンマ線照射試験の結果を図C-4に示す。

試験結果を見ると線膨張係数については電子線照射試験の結果において、低熱膨張ガラスセラミックスに最大 $1.5 \times 10^{-7}/K$ 程度の変化がみられる。ただし、本試験は照射レートが実際の軌道上環境と比べて非常に大きいため解釈については注意を要する。照射レートを3桁下げたガンマ線照射試験においても変化の大きさは小さくなるものの、同様の傾向がみられる。一方でそのような過剰な環境においてもコーディエライトセラミックスの線膨張係数には変化がなく、20年相当の照射を受けても変化はない。弾性係数については試験を実施したコーディエライトセラミックスおよび低熱膨張ガラスセラミックスのいずれにおいても静止軌道20年相当の照射による大きな変動は見られなかった。線膨張係数と弾性率いずれの場合もコーディエライトセラミックスの数値に変動は見られず、コーディエライトセラミックスの機械的特性は従来のガラスセラミックス材相当に高い耐放射線性を有するものと言える。

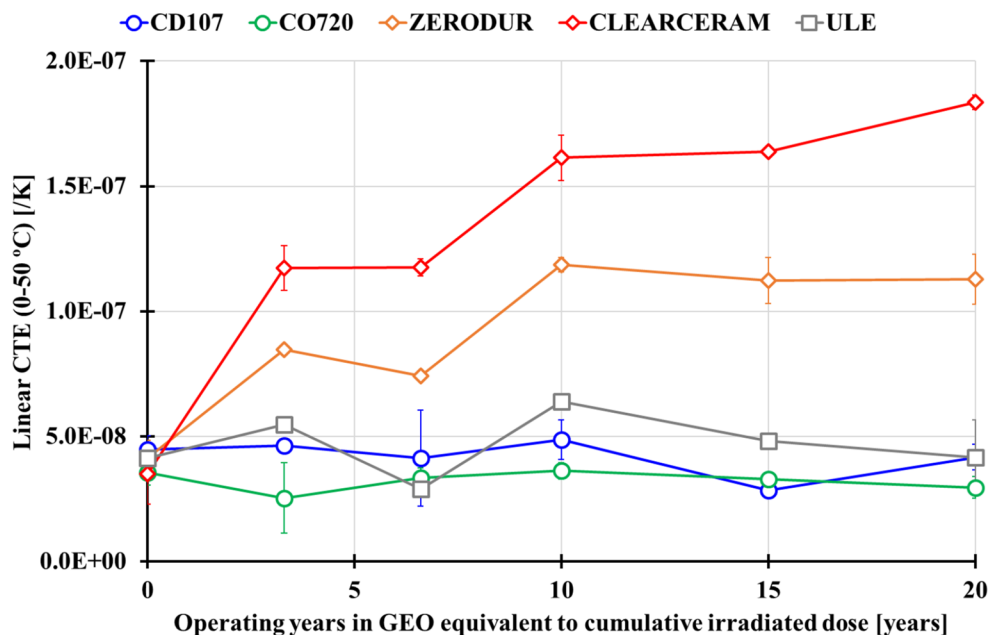


図 C-1 電子線照射試験による線膨張率の線量依存性。横軸は照射量の静止軌道等価年数^{C1)}

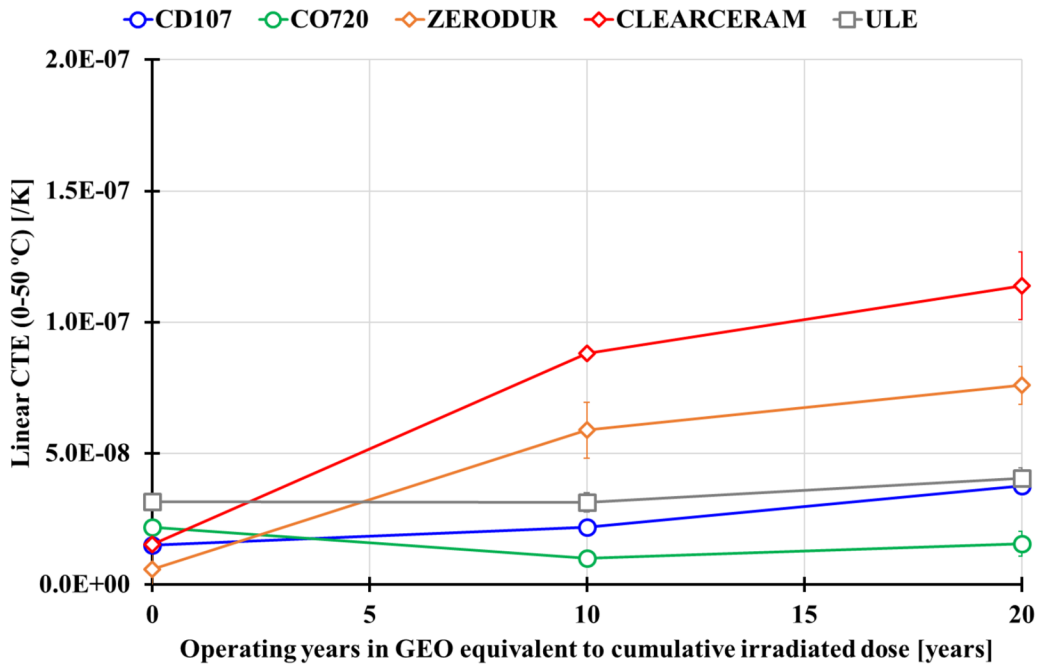


図 C-2 γ 線照射試験による線膨張率の線量依存性. 横軸は照射量の静止軌道等価年数 ^{C1)}

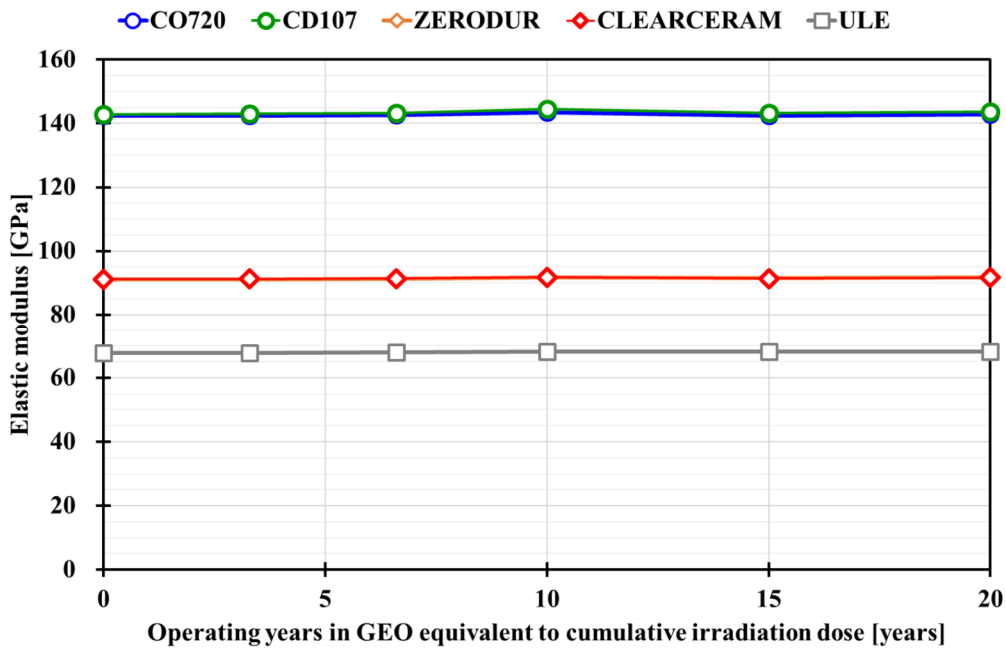


図 C-3 電子線照射による弾性率の線量依存性 ^{C1)}

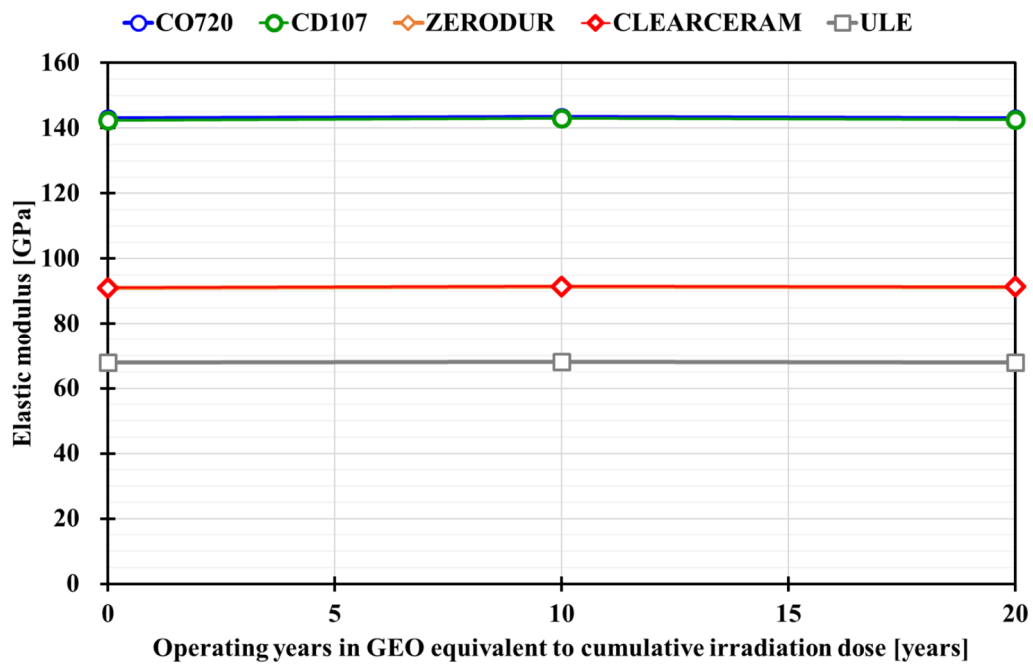


図 C-4 γ 線照射による弾性率の線量依存性^{C1)}

C.2 熱光学特性の放射線耐性

長期間の電子線、陽子線、紫外線、原子状酸素などへの露出によりコーディエライトセラミックスの熱光学特性がどのように変化するかについても検証が実施されている^{C1),C2)}。宇宙用ミラーとしての使用を想定した場合、これらの放射線や原子状酸素による影響は、素材そのものの変色、および、保護コートや Ag, Al などの金属蒸着膜へのダメージなどによるものが考えられる。それら劣化要因について切り分けするため、各試験において供試体は極力、ブランク、銀コート、銀コートに保護膜をつけたものを用意している。ここでは、コーディエライトセラミックスと低熱膨張ガラスセラミックス間の比較が可能となるようにサンプルを選択し試験を実施した。保護コートについては静止光学衛星のミラーにて使用が想定される SiO₂を対象としている。以降にこれまで実施された個別の試験結果を示す。

最初に電子線照射による太陽光吸収率(図 C-5)と垂直赤外放射率(図 C-6)の変化についての結果を示す。この試験において線量は静止軌道宇宙放射線環境 20 年間で想定した 2×10^{13} electron/cm² とし、電子のエネルギーは 2MeV とした。電子ビームの電流は 1.5nA である。この照射レートは実環境より高めであるが、別途線量率と熱光学特性の相関を調べた範囲では有意な影響は確認されなかったため試験スケジュールとの兼ね合いからこの値としている。試験を行ったサンプル数は各条件において 2 サンプルであるが、サンプル間に有意なばらつきは見られなかった。太陽光吸収率と垂直赤外放射率の計測は初期値、30%、100%と段階的に実施し、線量による変化の過程を観察した。試験結果を示す図 C-5 および図 C-6 によると、電子線照射による変化としてはブランク材料で若干太陽光吸収率 α が増加しているものの、全般において特に顕著な変化は見られない。

次に陽子線照射による太陽光吸収率(図 C-7)と垂直赤外放射率(図 C-8)の変化についての結果を示す。この時の照射量は静止軌道上環境を想定し 5.0×10^{16} proton/cm² としていたが、現時点では試験としては 5%および 10%までの実施となっている。照射された陽子のエネルギーは 30keV、ビームの電流は 400nA である。照射エリアの範囲は 25mm×25mm となっている。サンプル数は各条件において 2 サンプルである。試験結果を見ると、太陽光吸収率は CO720 および ZERODUR のどちらも照射に伴って微増している。保護膜による差異は顕著には見られないため、変化は保護膜より下の層にて生じているものと推定されている^{C1)}。

紫外線の照射による太陽光吸収率(図 C-9)および垂直赤外放射率(図 C-10)の変化を以下に示す。この試験では、ミラーがフードのある環境下で使用されることを想定し、400 ESD (Equivalent Solar Days, 地球近傍での太陽光強度 1 Solar を 1 日分照射した状態が 1 ESD)紫外線を照射した。また、本試験においても途中経過を見るため、10%、50%、100%の照射時間にて計測を実施している。今回の照射量の範囲では、紫外線照射による有意な熱光学特性の変化は見られなかった。

最後に主に低軌道衛星で想定される原子状酸素への暴露による太陽光吸収率(図 C-11)と垂直赤外放射率(図 C-12)の変化を示す。原子状酸素の暴露量は太陽活動に相関して大きく変動することが知られているが、今回は低軌道周回衛星(GOSAT)の軌道における 2020/01/01 0:00 からの 10 年分相当の暴露量を想定した。照射密度としては 1.13×10^{21} atoms/cm² を仮定した。今回も計測は照射量に対して 10%、50%、100%の 3 回に分けて実施されている。

原子状酸素への暴露に対しては CD107, CO720, ZERODUR とともに Ag 蒸着の状態急速に太陽光吸収率、垂直赤外放射率が変化した。ただし、ブランクや SiO₂の保護コートが施された状態では顕著な変動はないため、これらの変化は Ag の反応によるものと想定される。Ag 蒸着を施す場合も、SiO₂の保護コートによって原子状酸素への暴露による影響を小さくすることが可能と考えられる^{C1)}。

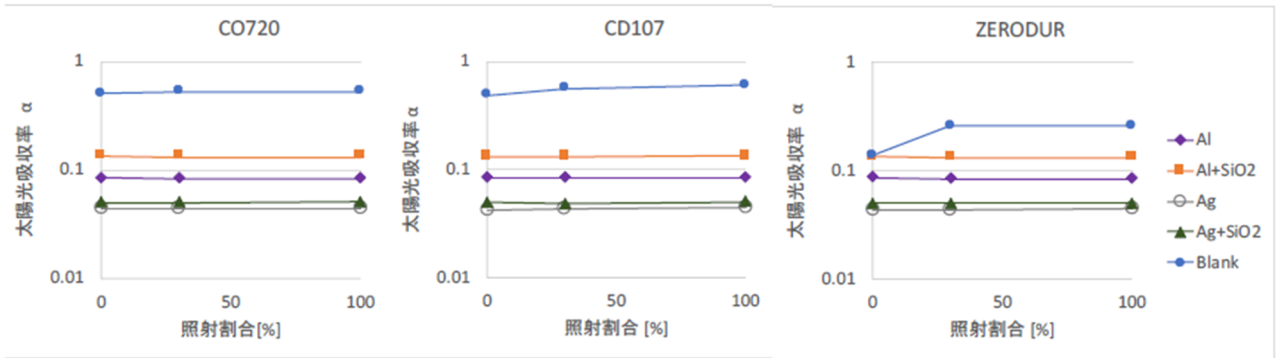


図 C-5 電子線照射による太陽光吸収率の変化 (C1)

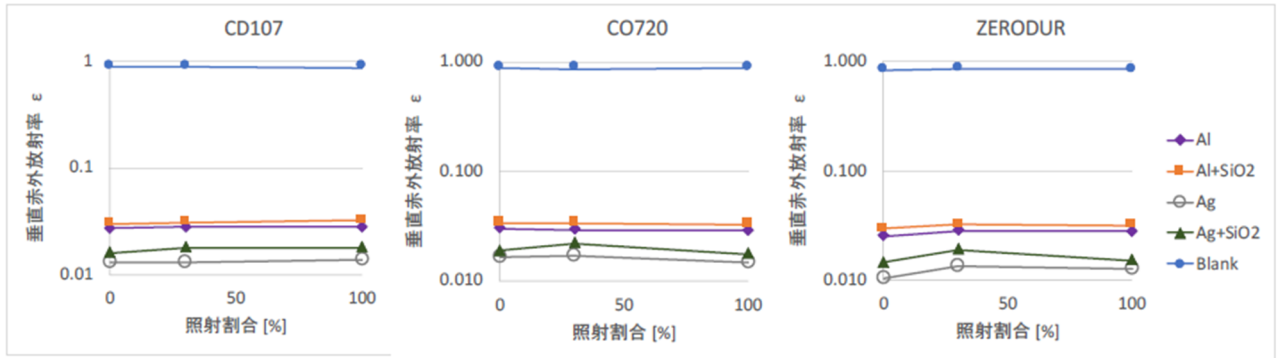


図 C-6 電子線照射による垂直赤外放射率の変化 (C1)

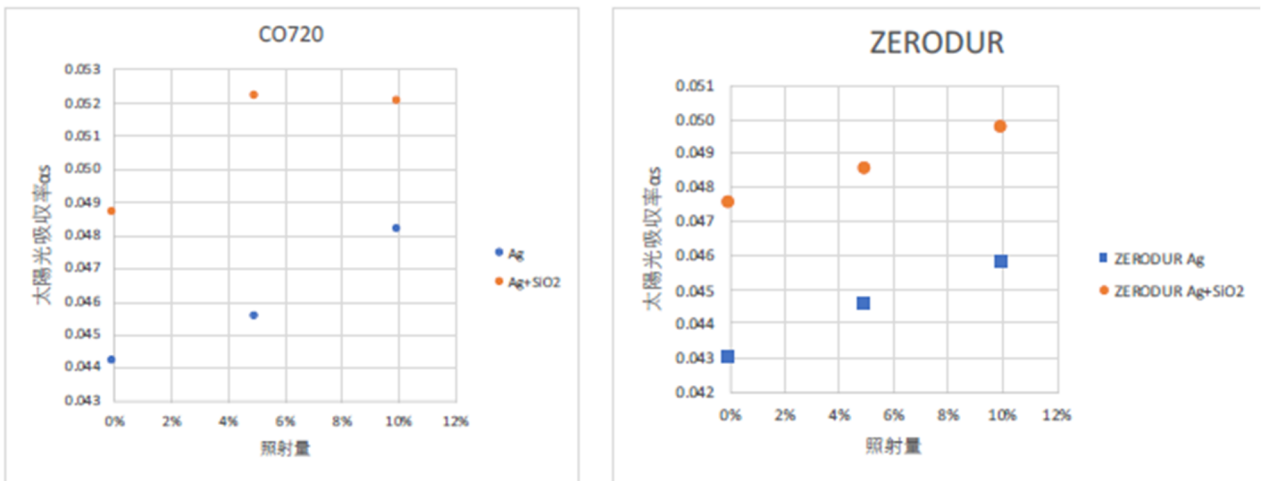


図 C-7 陽子線照射による太陽光吸収率の変化 (C1)

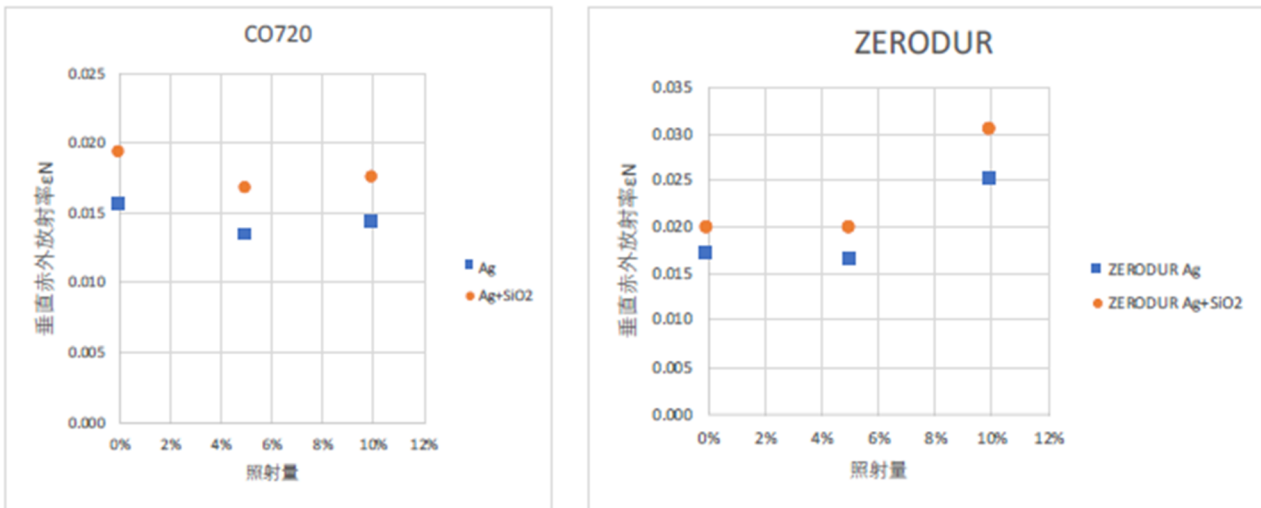


図 C-8 陽子線照射による垂直赤外放射率の変化 ^{C1)}

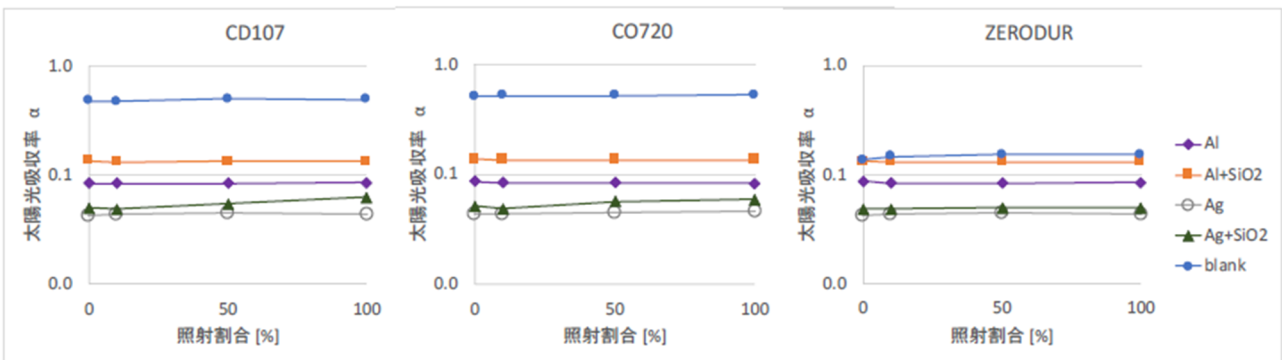


図 C-9 紫外線照射による太陽光吸収率の変化 ^{C1)}

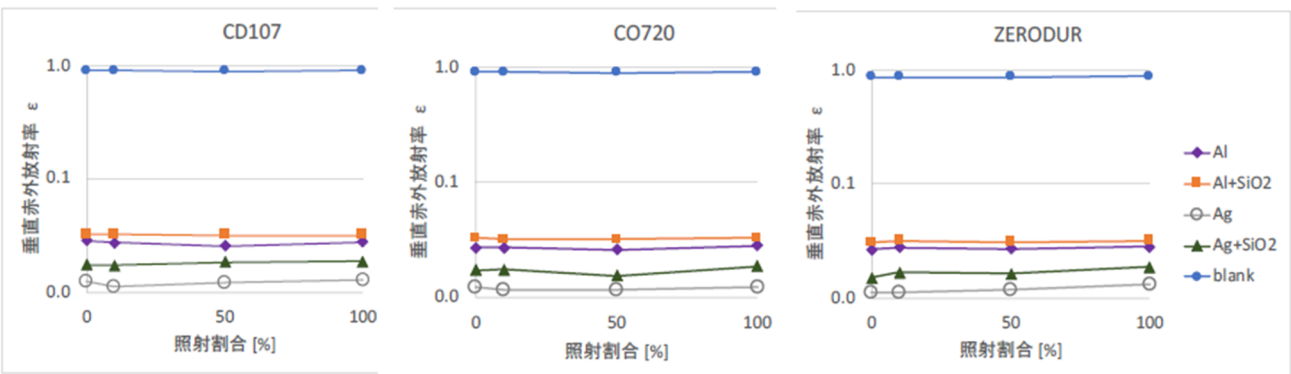


図 C-10 紫外線照射による垂直赤外放射率の変化 ^{C1)}

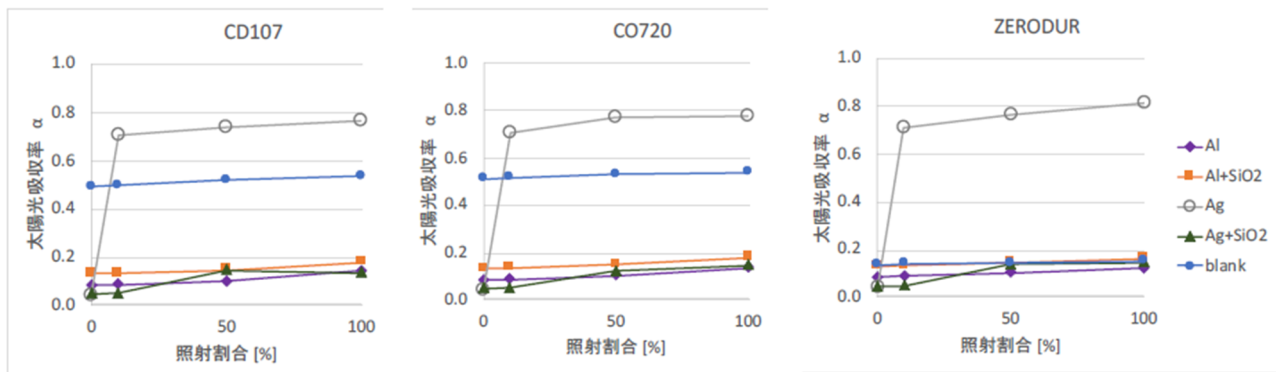


図 C-11 原子状酸素照射による太陽光吸収率の変化^{C1)}

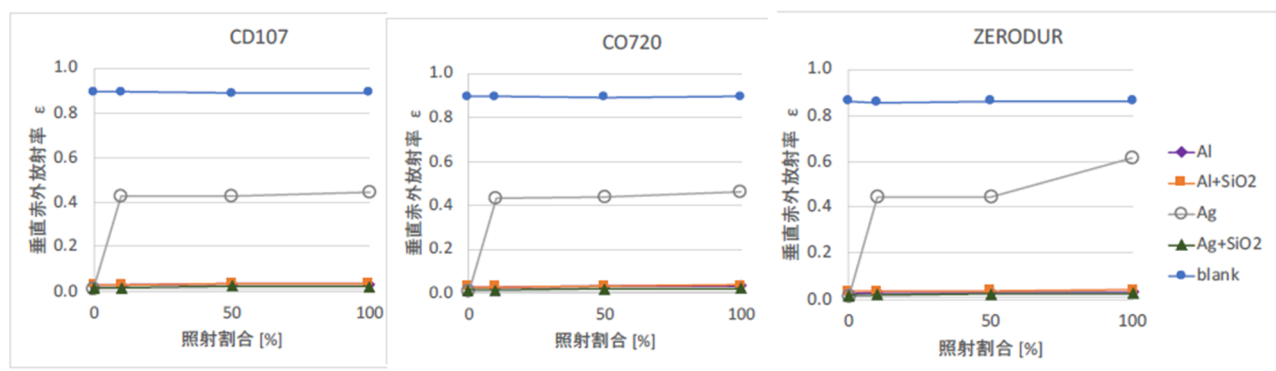


図 C-12 原子状酸素照射による垂直赤外放射の変化^{C1)}

付録.C. 参考文献

- C1. 上野遥, 水谷忠均, 大島武, 鏡母材候補材料の宇宙環境耐性評価, 第 65 回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2021-4145, 1J08, 2021.
- C2. Haruka Ueno, Tadahito Mizutani, Space environment resistance of thermo-optical properties of low CTE ceramics and glass, SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, Proc. SPIE 11451, 1145119, Dec. 2020.
- C3. 上野遥, 神谷友裕, 水谷忠均, 低熱膨張セラミックスおよびガラスの放射線に対する物理特性の変化, 日本セラミックス協会 第 31 回秋季シンポジウム, 2018 年 9 月.
- C4. Haruka Ueno, Tomohiro Kamiya, Tadahito Mizutani, Radiation Resistance of Physical Properties of Low CTE Ceramics and Glass in High-dose-rate Environments, SPIE Optical Engineering + Applications, Proc. SPIE 11116, Aug 2019.
- C5. Haruka Ueno, Tomohiro Kamiya, Tadahito Mizutani, Evaluation of Changes in Physical Properties of Low Thermal Expansion Ceramics and Glass Induced by Radiation, SPIE Optical Engineering + Applications, Proc. SPIE 10742, 1074204, Sep 2018.

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-23-002

JAXA Research and Development Memorandum

宇宙望遠鏡向けミラーへのコーディエライトセラミックスの適用性検討

Investigation of applicability of cordierite ceramics to mirrors for space telescopes

発行 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1
URL: <https://www.jaxa.jp/>

発行日 2024年1月11日
電子出版制作 松枝印刷株式会社

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。
Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

