TAK 技報

研究報告書 超小型人工衛星用反射望遠ミラーの量産化

平成23年3月15日 株式会社 TAK システムイニシアティブ

はじめに

株式会社 TAK システムイニシアティブは、独自の光技術 を用いた新産業開拓のための先攻技術を追求しております。

「光で何ができるか?」という先人の問いかけに答えるべく、 日々の努力をしております。

本技術報告(TAK 技報と命名しました)では、当社の技術をより広く産業界にご利用いただくために作成するものであります。

この技術報告では十分にお伝えできないこともあります が、新産業をともに創りあげようとされている方々のお力に なればと思います。

株式会社 TAK システムイニシアティブ

代表取締役 瀧口義浩

目次

1	目	的	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	1
2	方	法	•	•	•	-	•	-	•	•	•	•	•	•	•	•	-	•	•	•	•	•	•	•	1
		(1)		鏡	の	材	料	の	選	定	•	•	•	•	-	•	•	•	•	•	•	•	•	1
		(2)		鏡	の	強	靭	性	を	高	හ	る	IJ	ブ	構	造	の	検	討	•	•	•	•	1
		(3)		凹	面	構	造	設	計	及	び	製	作	•	-	•	•	•	•	•	•	•	•	1
		(4	.)		各	試	験	評	価	-	•	•	•	•	•	-	•	•	•	•	•	•	•	•	1
3	結	果	•	•	•	-	•	•	•	-	-	•	•	•	•	-	•	•	•	•	•	-	•	•	1
		(1)		鏡	の	材	料	の	選	定	•	•	•	•	-	•	•	•	•	•	-	•	•	1
		(2)		鏡	の	強	靭	性	を	高	හ	る	IJ	ブ	構	造	の	検	討	•	•	•	•	2
		(3)		凹	面	鏡	構	造	設	計	及	び	製	作	•	-	•	•	•	•	•	•	•	2
		(4	.)		各	種	試	験	評	価	•	•	•	•	•	•	-	•	•	•	•	•	•	•	2
					詳	細	結	果	-	•	•	•	•	•	•	•	-	•	•	•	•	•	•	•	2
3–1	1		ம	面	鏡	材	料	探	索	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	3
3-2	2		ம	面	鏡	の	形	状	-	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	5
3–3	3		望	遠	鏡	評	価	用	画	像	処	理	装	置	•	•	•	•	-	•	•	•	•	•	7
3–4	1		大	気	中	凹	面	鏡	歪	み	評	価	•	•	•	•	•	•	-	•	•	•	•	•	9
3–4-	-1		レ		ザ		Ŧ	涉	計	に	関	し	τ	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	9

3-4-2	宇宙	望遠	氢鏡	に	お	け	る	熱	歪	み	•	•	•	•	•	•	•	•	•	11
3-4-3	大気	中加	熱	(-	ープ	ラブ	٦ć	句后	 夏 月	斤 力	口索	丸に	53	2	, 为 烈	<u>친</u> .	Ēð	(•	11
3-4-4	大気	i中-	-方	向	全	面	加	熱	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	15
3–5	熱真空	記题	€・	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	23
3-6	放射紡	限服	寸実	験	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	26
3–7	振動解	¥析 ·	• •	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	27
3–8	特許事	項·	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	27
3–9	まとめ)••	• •	•	•	•	•	•	•	•	•			•	•	•	•	•	-	27

1. 目的

本事業では、新規セラミック材料からなる口径20cmの超小型人工衛星用低熱膨張率大型反射凹面鏡を開発し、望遠鏡材料として宇宙環境における熱周期や放射線環境に強いことを 証明し、これを年間100機の超小型人工衛星打ち上げ構想に向けてその量産化のためのデ ータを蓄積する。

2. 方法

宇宙望遠鏡用凹面鏡としてこれらの超小型衛星に搭載した際に発生するさまざまな課題を考慮 し、安定した材料の探索を行うと同時に熱歪みの少なく軽量な構造を検討する。また,材料の選 定のために、新たなセラミック材と従来のミラー材料の宇宙環境(真空、熱周期、放射線環境な ど)における性能評価を行う。そこで、以下のような課題設定を行い、それぞれに関して検討を 加えた。

(1) 鏡の材料の選定

低熱膨張であること、高エネルギー粒子の照射による損傷が起こらないこと、加工や研磨行程 が少なくできる素材であること、リブ構造やねじ取り付け構造や内部恒温構造などを作り込みが できること等がある。そこで、本事業における当初には、インターネットを用いて、世界の衛星用セ ラミック凹面鏡の開発動向を調査し、それぞれの国における開発状況を把握すると同時に、市場価格な どの情報を取得する。さらに、国内におけるこれらの宇宙望遠鏡用の凹面鏡の開発状況を把握し、必要 となるガラス加工業者を探索する。その過程で、本事業の最終目的構造に適した凹面鏡材料の検討を行 い選定する。この際には、国内の凹面鏡加工業者との打ち合わせを行い、実際に国内で入手可能で加 工も可能な材料で宇宙応用が可能な素材を選択する。

(2) 鏡の強靱性を高めるリブ構造の検討

衛星の打ち上げ時の強い振動に対して、強靱性のある鏡にするためには、鏡の厚さと重量の最適化 を行うことと、リブ構造などを作り込み、さらには、内部の金属などで補強構造を入れることが望まれる。そ こで、本事業では宇宙望遠鏡用凹面鏡の形状の仕様を決定する。

(3) 凹面鏡構造設計および製作

この仕様に基づき、凹面鏡加工業者に凹面鏡構造および凹面鏡コーティングを発注する。この際、凹 面鏡の評価のために、カメラおよびモニターなどを備えた画像処理装置を購入し、画像計測の準備を進 める。

(4) 各種試験評価

凹面鏡の熱特性などを評価するために、光産業創成大学院大学と共同研究を行い、レーザー干渉 計による鏡面の性能の評価を行う。また、その際に凹面鏡をレーザー干渉計に設置するための凹面鏡 マウントなどの加工品を発注し、凹面鏡の納品後は、光産業創成大学院大学にて、凹面鏡の歪み計測 と熱歪み量の定量評価実験を行う。3月末に向けて報告書のまとめと、量産化の検討を開始する。

3. 結果

本事業の詳細な報告を記載する前に、3月初旬までの本事業における達成点をまとめておくこととする。

(1) 鏡の材料の選定

従来からある4種類程度の素材の特性を検討した結果、今回の新しいセラミック素材を選定した。 現時点で、メーカーとの秘密保持契約のためにその名称などを紹介できないが、本事業における評価 結果などをデータとして紹介し、その性能の高さを示す。

1

(2) 鏡の強靱性を高めるリブ構造の検討

実際に凹面鏡の開発では、バルクのセラミック素材から凹面を削りだす作業に2ヶ月以上の期間がかか ることが判明し、本事業のひとつの目的である強靱性を増すためのリブ構造の製造には至らなかった。し かしながら、凹面鏡の性能が評価できたことで、あとは量産の数と価格の問題だけであることがわかった ので、今後は、軽量化と合わせた強靱化のための構造の設計を進めることとしたい。

(3) 凹面鏡構造設計および製作

本事業の主題である実際に使える凹面鏡の製作のために、さまざまな素材加工ができる光学業者を検 討し、光産業創成大学院大学にて昨年度作製した SiC の凹面鏡と同様な仕様の凹面鏡を試作すること に成功した。

(4) 各種試験評価

光産業創成大学院大学との共同研究のもとに、新規セラミック素材の放射線試験や熱真空試験と言われる宇宙環境試験を行い、試作した凹面鏡の大気中での熱歪み試験を行い、石英からなる他の望遠鏡の凹面鏡よりもよい低歪み特性を達成し、これによる高精度宇宙望遠鏡が製造可能であることが確定できた。

【詳細結果】

宇宙環境で動作する超小型衛星における大きな問題は、真空下での衛星の軌道周回に伴う温度変化 である。400km の軌道では、90分に1回で地球を周回し、その際の温度差は、衛星の表面では+200 度 C からマイナス200度 C になると言われている。これらは完全な真空状態にて断熱的に繰り返され、冷 却の方法は唯一輻射による放熱であり、温度上昇のためにはヒーターによる加熱が必要である。



図1 衛星への熱入力(「衛星設計入門」茂原正道ら共編)

地球を周回する衛星に対して、太陽からの放射エネルギーEs によって周回の時間に応じて温められた り、冷やされたりする。(図1参照:「衛星設計入門」より抜粋)その結果として、衛星や望遠鏡に温度勾配 が発生し、熱歪みとして画像の劣化を起こさせる。また地球からの照り返し(アルベド)としても熱の流入が おこる。そこで、それらの量から、衛星内部の温度がどの程度上昇するかを、光産業創成大学院大学との 共同で見積もりをした。まずは、太陽光からは以下の Es のエネルギーが衛星に入射する。

Es= 1353 x (1+0.034, -0.0325) W/m²

これが、衛星の単位面積と単位時間あたりに入力する。

このため、衛星自身に与えられるエネルギーは、これに衛星の吸収係数と太陽光に対する断面積をかけたものになる。超小型衛星では、50cm角の断面形状を考慮しているため、単一面には338Wの太陽 エネルギーが入力することになる。太陽電池パネルを搭載しているため、この面での光吸収が電力と発熱 源となる。

一方で、地球が太陽光を散乱反射することによって、衛星に熱エネルギーを与える「アルベド」では、大まかに言って、400kmの軌道上では太陽光の Es の10%程度であると考えられる。これは、地表の各点からの散乱反射光が衛星に届くことから、比較的大きな値となっている。

衛星が地球を90分で1回周回することから、図のように、太陽光に対してさまざまな角度にて光を受ける 訳である。地球の裏側の夜の部分では、およそ40分程度は太陽光の影響がなく、地球からの輻射熱の みでの温度環境になる。

よって、昼間の空間を飛行する衛星では、太陽光に向かう面からは338Wの光エネルギーが入射し、地球に向いた面からは、およそ135Wの光エネルギーが入射することになる。夜間の地表の輻射熱はこの際無視してもよいかもしれない。

後述の超小型衛星のモデル解析によれば、衛星本体の内部は直接太陽光に照射されないために、衛 星本体の表面に施した反射散乱膜などの影響によって、上記のような過度な温度上昇とか冷却などは起 こらないことがわかっている。現時点での推定では、±50度 C 程度の範囲には入るものと思われる。

このような温度周期は、鏡面に対して周期歪みを起こし、母材の劣化やコーティング材の剥離などが起こるものと推定する。

3-1 凹面鏡材料探索

宇宙望遠鏡用凹面鏡の素材として、現状の調査結果としては、今回の新規セラミック材料以外に5つの 素材が存在していることがわかった。宇宙望遠鏡用の鏡の素材として必要な性能は、低熱歪み、耐振性、 強靱性、軽量、安価、量産性が高い、金とアルミコーティングが可能、耐放射線性、耐真空などである。当 社としては、これに加えて他社にない新規素材性ということがビジネス的に重要と考えている。

本事業において用いる新規セラミック材料の特性としては、室温近傍で熱膨張率がゼロになるように設計されており、密度はクリアセラムと同等である。色は SiC と同様に黒色をしており、SiC によく似た色合いである。

そこで、石英、SiC、ULE、クリアセラム、ゼロディアと本事業の新規セラミックの6種類の素材に対して以下のような性能比較を行った。熱歪みと軽量化を考慮し、表1にその名称と、熱膨張率、密度、ヌーブ硬度および熱伝導度を記載した。

材料	熱膨張率	密度	硬度	熱伝導率
	(10 ^{−8} ∕°C)	(g∕cm ³)	(ヌーブ)	(ワット/ m・k)
石英	51	2.20	489 (820)	1.4
炭化シリコン	410	3.22	(2480)	170
ULE(コーニング)	$\pm 1 - 2$	2.205	460	1.31
クリアセラム(オハラ)	0 ± 2	2.55	$600 \sim 620$	$1.49 \sim 1.54$
ゼロデュア(ショット)	0 ± 5	2.53	620	1. 43
新規セラミック材	$\sim 0\pm 20$	2.55	(708)	3.7~3.9

表1 宇宙望遠鏡用凹面鏡の素材

石英と炭化シリコン(SiC)は一般的な光学あるいは筐体素材として用いられている材料系であり、特に 石英は透過型望遠鏡のレンズなどの素材として広く用いられている。SiC は、光産業創成大学院大学が

開発した宇宙望遠鏡用凹面鏡の素材として用いたものであり、アルミナ以上の硬度を持ち、高温特性に 優れた材料である。熱伝導率は高いが、熱膨張率がやや大きいため、宇宙環境では熱変動が大きい環 境では画像の熱歪みが多くなる可能性がある。また、密度が3.22と重いために、重量が常に問題となる 打ち上げに対して、課題となることは否めない。しかしながら機構的な強度などを追求した凹面鏡の例と して、非常に優れたものであると判断できる。一方、表1において、青く塗った3種類の素材は、超低熱膨 張率のセラミック材料として光学分野に用いられている。ULE はコーニング社の開発したセラミック素材で、 スバル望遠鏡の主鏡の材料として使われた経歴がある。5度から35度の地上での温度環境において膨 張率がゼロになる材料となっている。合成石英と同じ成長方法によって作製できるため、光学的にも均一 性の高いものとなっており、透過型の光学素子でも重要な性能を示しそうである。クリアセラムはオハラが 開発した素材で、ULE よりも更に広い0度から50度の間でゼロ膨張率を達成しているという素材である。 宇宙関係の実績に関しては、未調査であるが、素材として経年変化があるといわれている。ショット社のゼ ロデュアは、宇宙環境にも使える素材でありレーザージャイロなどの高精度光学部材として用いられると 同時に、一般の地上用の望遠鏡でも用いられている。宇宙望遠鏡用の鏡の素材としては、これらの素材 のいいとこ取りをしたような素材が望まれる。つまり、SiC のような高い硬度を用いながらも、ゼロディアなど のような低熱膨張率であり、石英程度に軽い素材であることが必要である。そこで、表1を改めて見てみる と、今回の新規セラミックは、クリアセラム程度に軽く、熱膨張も低く、SiC の3分の1程度の固さを有し、熱 伝導率も他の低熱膨張セラミック以上の値を示していることがわかっており、この新規セラミックは総合的 に見たら、現時点で得られる最も適した宇宙望遠鏡用素材であると考えられる。

本事業にて開発した凹面鏡の素材はメーカーとの秘密保持契約によって名称は現時点では公開できないので、議論を進めるために、ゼロデュアを用いた構造例などを主体として調査を進めた。ゼロデュアはショット社から販売されている素材であり、さまざまなデータが公開されており、宇宙応用の検討を進めるには好都合な材料である。

ゼロデュアは、密度としては石英よりやや思い素材であるが、SiCよりも軽く重量の制限の多い打ち上げ のためには重要な材料である。機械加工性も高く、研磨による平面性の追求も可能である。その結果、X 線望遠鏡や気象衛星や彗星探査機の反射鏡の母材として用いられた実績がある。製造方法は、溶融と 精製を行った素材を高温で整形する従来のガラス製造法に加え、温度制御によるアニーリングを行い、 内部の結晶構造とガラス構造のバランスを達成する。およそ70~78%の母材が結晶化しており、負の線 膨張特性を有する石英構造と正の線膨張特性を有するガラス構造からなる。これらの構造のバランスを 選択することで、必要な温度範囲においてゼロ膨張率を達成する。ショット社のゼロデュアのカタログでは、 ゼロデュアなどのセラミックガラスの製造工程と思われる写真が示されている。(ショット社のH P http://www.us.schott.com/advanced_optics/english/our_products/zerodur/?highlighted_text=zerodu rを参照)メルトさせたガラス材料をリファインしてから、大型の炉にて均一化した後、除冷に時間を掛け ながら結晶化の調整を行っているものと考えられる。上記のように、結晶性の制御である除冷の温度管理 が最も重要な点であることを考慮すると、この素材を用いて、リブ構造などを事前に型にして作り上げるに は困難が予想される。その意味では、同様にショット社のカタログにあるような大型の母材から切り出して、 さらに超音波研削などの方法によって加工する方法を用いることになりそうである。また、加工されたゼロ デュアの高精度計測を行って、高い精度の加工を進めることができることも示されており、レーザージャイ ロのような超高精密な複雑な形状での加工ができているのがわかる。

このようなセラミック素材に対して、穴加工を施すことで、材料の軽量化を狙った構造例もショット社の技術資料44に記載されている。さまざまな形状で彫り込むことで、技術資料では70%程度の軽量化が見込

4

まれると示されている。その点では、価格を押さえる工夫としては、なんらかの安価で高速な研削方法を 探求する必要性もありそうである。本事業にて用いる新規セラミック材に関しても、加工業者によれば、セ ラミックの焼結前にリブ構造を作り込み、セラミック化することで軽量化は可能としており、本事業の予算や 期間内では達成できなかったが、量産が決まればこのような取り組みも可能との保証を得ている。このよう に、さまざまな光学素材やセラミックミラーに対して、彫り込みを行うことで軽量化ができるが、以下に示す 宇宙望遠鏡用の凹面鏡形状を考慮すると、おおよそ500cm³の体積を有することになる。今回試作した新 規セラミック凹面鏡の重量が1.31kgであり、これを素材の密度である2.55g/cm³で割ると、上記体積が 得られる。この体積を用いて、表1に示したような素材でできた場合には、推定重量として表2に示したよう に、70%の彫り込みの有無によって重量がかわることになる。国内のH2Aを用いた打ち上げにおいて、1 kg当たりの打ち上げコストが例えば600万円かかるとすれば、表2の右端に示した金額が70%の彫り込 みによって生まれる削減コストになる。逆に、この金額分だけ彫り込みに金額を投資しても、同程度の成 果が達成できることになり、あとは、いかにこの彫り込みを安価で行うことができるかによることとなる。本事 業に用いる新規セラミック材料も、同様に550万円程度の打ち上げコストの低減ができると予想され、リブ 構造化のための型代などへの投資も可能である。

材料	密度(g/cm ³)	彫り込みなし(g)	70%彫り込み	削減コスト
			(g)	(万円)
石英	2.20	1130	339	475
炭化シリコン	3.22	1654	496	695
ULE(コーニング)	2.205	1130	339	475
クリアセラム(オハラ)	2.55	1310	393	550
ゼロデュア(ショット)	2.53	1300	390	546
新規セラミック材料	2.55	1310	393	550

表2 360cm³の体積を考慮した凹面鏡の重量比較

以上のように、本事業にて採用した新規セラミック材料は、後述するような低歪み性能を示しながらも、 軽量化が可能で、SiC の3分の1程度の固さを有し、熱伝導率も他の低熱膨張セラミック以上の値を示し、 従来の宇宙用ミラー素材代替素材として有効であることがわかった。

3-2 凹面鏡の形状

宇宙望遠鏡の形状は、光産業創成大学院大学にて行われた文部科学省の超小型衛星研究開発事業 にて設計された形状情報を共同研究の元に入手し、その宇宙用望遠鏡の凹面鏡の形状をそのまま用い ることとした。これにより、同様な仕様の凹面鏡が光産業創成大学院大学にて数種類準備できることから、 熱特性の比較が容易になる。石英からなる凹面鏡、SiCからなる凹面鏡(ただし、一部修正中のため、本 事業のための3月末までの試験はできない)、そして本事業によって作られた新規セラミック凹面鏡の3種 類である。これらの凹面鏡の形状は、図5に示したものにほとんど近い。ただし、作製の段階で、より高次 の局面補正がされている凹面鏡もある。本事業に用いた新規セラミック素材は、現在、まだ研磨手法の検 討中であることもあり、高次の非球面加工までできていないが、基本的には研磨可能であることがわかっ ており、本事業において、他の性能をクリアできれば、本式な事業として採用していくこととしたい。



図5 本事業において作製した凹面鏡の概略形状



図6 光産業創成大学院大学にて開発された宇宙望遠鏡の外観写真

図6には、光産業創成大学院大学にて開発された望遠鏡の長さが20cmである宇宙望遠鏡の外観 写真を示している。アルミの鏡筒の厚さをできるだけ薄くしているが、構造の強度を保ちながら の軽量化は困難な点である。

光学系	リッチー・クレティエン系							
口径 D(mm)	200							
入射瞳位置	主鏡(口径 200 となる位置)							
主鏡(凹双曲面)								
近似 R(mm)	438.7							
外径(mm)	205							
内径(mm)	50							
有効径(mm)	200							
厚さ (頂点での) (mm)	10							
副鏡(凸双曲面)								

表3 宇宙望遠鏡 光学パラメーター

曲率半径 R2(mm)	145. 6
外径(mm)	56
厚さ(頂点での)(mm)	9
主鏡•副鏡間距離 d(mm)	159. 5
合成焦点距離 EFL(mm)	803. 4
バック・フォーカス BF(mm)	42.3

また、表3には、文部科学省にて作製した宇宙用望遠鏡の凹面鏡の主要な光学パラメーターを示して いる。実際には、さらに詳細な光学パラメーターがあるが、これは秘密保持契約上、公開できないことにな っている。図7には、この仕様にて研磨を行った本事業の試作凹面鏡の外観写真を示している。



図7 本事業にて試作した新規セラミック凹面鏡の外観写真

図7の右側に示したのが裏面の様子で、SiCのような灰色がかった素材であることがわかる。

3-3 望遠鏡評価用画像処理装置

今回の望遠鏡用凹面鏡の基礎実験では、副鏡を用いることは止め、直接高感度 CCD カメラを 主鏡の焦点面に配置して、画像取得をすることで空間分解能の評価を行うこととした。(図8参照)



図8 凹面鏡の焦点位置に高感度長時間積算型 CCD カメラを配置

これにより望遠鏡の焦点距離が短くなるが、光軸調整が不要なため、簡単に評価できるため、本 事業の評価ではこの配置による画像評価とした。 その際の画像計測装置としては、図9に示し た構成にて、本事業において立ち上げた。CCDカメラとしては、ワテック社の長時間積算型白黒 カメラを新規購入し、これらからのビデオ出力をコンピューターに画像取り込みボードを取り付 け、内部のLabViewによる画像処理ソフトを搭載させた画像取得装置にて画像データ化することとなる。



図9 望遠鏡と画像取得装置および画像表示装置からなる画像処理系

この画像処理系を用いることで、通常のテレビレート(33ミリ秒)での画像計測から8秒間 までの長時間積算画像の読み出しまで可能となり、長時間の間で発生する画像歪みの可視化が可 能となった。一般的な画像処理装置では、画像取り込みボード内のメモリーあるいはコンピュー ターのメモリーに画像データを積算させるなど、特殊なボード環境が要求されるが、本装置では、 画像はカメラ内で積算されるため画像ボードなどは安価なものが使えるなど、メリットがある。 図10に、この画像処理系の全体写真およびカメラと望遠鏡の出力部を示した。



図10 画像処理系の外観写真とカメラ部

図10に示した望遠鏡は光産業創成大学院大学にて開発された宇宙望遠鏡であり、この望遠鏡の性能も評価できるように、望遠鏡の出力側に長時間積算型の CCD カメラを接続し、その出力を画像処理装置に入力することで、画像の解像度や熱歪みなどを解析できる。この長時間積算型の CCD カメラの出力は、通常の NTSC であるため、小型のアナログモニター(図10の右上の小型モニター)にもリアルタイムにて表示が可能である。

さて、上記の画像処理系は、図10の写真の左奥に2台並ぶコンピューターのうち、左側のものが本事業にて導入した画像処理系を含むものであり、LabViewの最新版がインストールできている。LabViewのライブラリーにある画像処理アルゴリズムなどを用いることにより画像の差分

解析などができるために、熱輻射によって暖まっていく凹面鏡の時間変化が記録/解析できることになった。

3-4 大気中凹面鏡歪み評価

3-4-1 レーザー干渉計に関して

光産業創成大学院大学の保有しているレーザー干渉計により大口径の凹面鏡の歪み特性が評価可能 である。図11には、大学院大学の干渉計の全景を示した。光学定盤に設置された干渉計で、ザイゴ社製 である。開口面の大きな凹面鏡を設置できるように、光軸上に沿って大型の移動レールが設置されている。 この上に、ミラーを設置する。







図12 大型凹面鏡用固定治具

図12には、光産業創成大学院大学の所有する20cm 以上の凹面鏡を固定するための治具を示している。当初は本事業でも、凹面鏡の評価のためにこのような治具を準備することを考えていたが、この治具が本事業にて作製する凹面鏡の評価も可能であることがわかり、その製作は取りやめすることとなった。

本事業では光産業創成大学院大学との共同研究において、本事業にて試作した凹面鏡と同時に、参照のために石英製の20cm 口径の凹面鏡と2種類の凹面鏡の計測を行うこととした。

最初に、石英凹面鏡を用いて熱歪み特性の比較実験を行うために設置したときの写真が図13に示して いる。その際得られているリアルタイムの干渉縞が図14に示されている。この干渉縞はミラーの



図13 石英製凹面鏡の設置

図14 干渉縞の画像



図15 レーザー干渉縞の例

図16 凹面鏡の歪み量波面解析結果

初期設定位置による空間位置ずれの情報も含んでおり、ここからこのずれを取り除くために、レーザー干 渉計は干渉軸を振動させて、変化成分のみを検出し、波面の歪み情報を取得する。この結果、干渉計に よる凹面鏡の歪みがレーザーによる球面波との干渉縞として図15のように見えている。このような干渉縞 を積算して鏡面の歪み量を解析することで、図16に示すような疑似カラー表示によって、波面の形状が 可視化できている。

次に、本事業にて試作した新規セラミック凹面鏡の設置の様子を図17に示した。この図に示しすよう に、光産業創成大学院大学にて準備した取り付け治具は十分に保持ができることがわかった。この際、こ の治具の熱特性の影響を避けるために、凹面鏡と治具の間に振動防止用の緩衝材を挟み込んでいる。 左の写真から明らかな点は、中央部の円形開口の直径は図13に示した石英凹面鏡に比較して小さいこ とと、本事業の凹面鏡の曲率が図13の石英凹面鏡よりも小さく、短軸性であることがわかる。



図17 本事業にて試作した凹面鏡の設置

この治具をレーザー干渉計に設置したところが図17の右写真に示している。曲率が表3に示したように 438.7mm であるため、レーザー干渉計の集光レンズの焦点から438.7mm の位置にこの凹面鏡を設置 して、波面の計測を行うこととなった。 3-4-2 宇宙望遠鏡における熱歪み

超小型衛星は、前述のように太陽と地球からの光により熱エネルギーを受け、衛星本体からの輻射によってその熱エネルギーを宇宙に放射する。それと同時に、衛星本体内の電子機器がおよそ45Wの消費を行うが、その際の局所的な発熱も本体と望遠鏡への熱歪みを与えることになる。光産業創成大学院大学の情報によれば、図18に示したように、太陽からの熱エネルギーと衛星構造を考慮した上でカメラや電子回路からの熱によって、最高温度としては、衛星本体からの熱の流入によって望遠鏡の取り付け部の温度が40度近くまで到達している。低温条件では、同一部分で-20度程度になっている。



図18 望遠鏡に接続するカメラ筐体部の温度解析結果

このことから、真空状態では、おおよそ-20度から+40度の範囲で望遠鏡が局所的に加熱されることが 推定できた。

そこで、この温度分布のシミュレーション結果に基づき、以下にまとめた大気中および真空中で室温から最大80度までの熱歪み試験を行った。残念ながら低温での試験は、大気中実験であるためにできていない。

3-4-3 大気中加熱(一方向局所加熱による熱歪み)

宇宙空間にて一方向から太陽光が入射したり、機器の動作による高温動作による一方向加熱により、ミラー面が歪む可能性があることから、まずは、一方向から熱が流入した場合に、どのように熱歪みが発生するかを計測評価した。ここで、用いたのはヒートガンであり、空気を温めてからミラー面に熱流として、図

19に模式的に示したように、水平斜め方向から当てている。

10秒間ほどヒートガンによる200度程度の温風 を当てた後に、23度 C(湿度40%)の室内環境 にて冷却を行った。その際の、ヒートガンを止め てからの凹面鏡の歪みの緩和の過程を分オーダ ーにて計測した。

最初に、石英製凹面鏡の性能評価を行い、図 20のそれぞれの画像がレーザー干渉計の出力 像とそこから解析的に得られた波面歪みの変化 を示している。冷却開始からおよそ5分間の変化



図19 ヒートガンによる局所的な高温化



(a) 冷却開始時



(b) およそ1分後



(c)およそ2分後



(d)およそ3分後



(e)およそ5分後

図20 石英製凹面鏡の干渉縞とその際の波面歪み量の疑似カラー表示の時系列の変化例

を1分程度おいて計測している。それぞれの図の右の波面歪みにおける赤から青までの波面数値が、相対的な波面歪みの大きさを示す。図20の右の波面歪みの画像の赤から青までの歪み量を図から拾いだし、経時的な変化から歪みの緩和を評価した。図21にその時間的な変化の様子を示している。当然ではあるが、冷却開始における放熱量が多く、顕著に歪みが緩和しているが、最終的には室温の歪み量に収束している。



次に、本事業にて試作した新規セラミックによる凹面鏡に対して同様なヒートガンによる熱歪みの計測を 行った。ここでは、石英凹面鏡では10秒の加熱を行ったのに対して、およそ1分間の長時間にわたって 連続的に水平方向に加熱を行った。そのため、石英に比較して照射した熱量は6倍になっている。

図22には、ヒートガンで温める前の凹面鏡の干渉縞の写真を示している。球面加工をしているため、レ ーザー干渉計では球面で干渉を調整して計測する訳ではあるが、この計測では、その焦点状況から少し ずらして、球面の収差を出したところで計測している。左の写真のように、干渉縞が同心円状に得られて いる。この段階で波面を振動させて局面の計測を行ったのが右の図である。

次に、上述のように1分間ほどヒートガンで水平方向から熱負荷をかけた後、ヒートガンを止め、それから 1分後に得られたレーザー干渉計による凹面鏡の熱歪みを図23に示した。この結果を図20の(a)の結果 と比較することで、この凹面鏡の性能の良さが一目でわかる。6倍の熱負荷に対して、若干の水平方向の 歪みは見えるが、局所的な大きな熱歪みが起こらない。図23の左の写真における干渉縞のゆらぎは大気



図22 初期状態の干渉縞(球面の焦点から少しずらして設置)





図23 熱負荷終了 1分後の波面



(**a**) 2分後



(b) 3分後



(c) 6 分後

図24 本事業にて試作した凹面鏡の熱緩和特性

のゆらぎによる歪みであり、凹面鏡の局所的な歪みではない。その歪みの量を右図の赤から青までの歪 み量で比較しようとしても、熱負荷をかける初期状態のほうがかえって歪みが大きくなっており、定量的な 比較は図20の石英に比較して明確にできない。すなわち、この素材での熱歪みは、この程度の熱負荷 では顕著には現れないということに結論でき、素材として人工衛星の熱周期環境には強いことがわかる。

3-4-4 大気中一方向全面加熱

つぎに、上述のような局所加熱ではなく、大型のヒーターを用いて凹面鏡全体を斜めから昇温させること とし、図25にその配置を示す。上記のような局所加熱は、地表から太陽の反射像が写り込んだときに対 応すると思われ、この全面の加熱が衛星全体が太陽によって加熱される場合に対応すると考える。



図25 大型ヒーターによる温度可変

ヒーターはおよそ800Wの出力であり、太陽光が1300W/m²の加熱であるが、ほぼその程度の熱の流入に対応すると思われる。この際、この熱が凹面鏡とそのホルダー治具にあたっている。そのため、温風の時と比較して、鏡部分と同時に治具全体の温度も少しずつ温度があがっており、そのため歪みも凹面鏡そのものの熱歪みと同時に、保持治具の熱歪みによる凹面鏡への応力も効いているものと推測する。 簡単な非接触温度計では、治具のヒーターに近いところでは、60度を超える温度に達していた。よって、 試作の凹面鏡の実験では、ミラー保持部に収縮を吸収する緩衝材を取り付けることとした。

まずは、石英凹面鏡に対して、この昇温過程における波面歪みの増大を時間的な流れで示したのが、 図26であり、加熱開始から1分ごとに波面の変化を計測している。さらに、図27には、8分加熱したのちに、 ヒーターを切って室温まで戻る際の歪みの変化を同様に計測した結果を示している。



(a) 加熱開始1分



(b)加熱開始2分



(c) 加熱開始3分



(d) 加熱開始4分







(f) 加熱開始6分



(g) 加熱開始7分



(h) 加熱開始8分

図26 800Wの大型ヒーターによる全面斜め照射による熱歪み

ヒーターを切ることでエネルギーの供給はなくなるが、凹面鏡の保持治具の温度がまだ高いと 思われ、その熱の拡散はヒーターを切ってからも続いている可能性がある。そこで図28に示す ように、波面の赤と青の差である PV 値などを時間的にプロットしてみると、図21の時のよう な局所的な温度上昇の場合の波面歪みの解消ではなく、ゆっくりとした波面の変化であることが わかる。



(a) 冷却開始1分後



(b) 冷却開始2分後



(c) 冷却開始3分後



(d) 冷却開始4分後



(e) 冷却開始5分後



(f) 冷却開始6分後



(g) 冷却開始7分後

図27 大型ヒーターによる昇温後の冷却特性



図28 大型ヒーターによる熱膨張の時間的変化

また、図28に示すように、熱源が切れても熱歪みが増えていることが明らかで、これは鏡以外の部分からの熱の伝導や熱膨張率の差によって、条件によっては凹面鏡の熱歪みの変化に微妙に遅れが生じることと考えられる。つまり、大型ヒーターを用いた実験でわかったことは、

(1)鏡の素材における温度特性と同時に、それを保持する素材の温度特性の両者を考慮して初めて、 望遠鏡の熱歪み特性が評価可能であること。望遠鏡の素材の熱緩和速度の差も、逆に凹面鏡に対して、 歪みを与える可能性があること。(ただし、図26や27に示された波面の歪みのほとんどが、直接の加熱に よるミラーの熱歪みであることは、治具による凹面鏡の固定は3カ所で行われているが、歪みは左右の方 向のみで顕著であることからもわかる)

(2)熱歪みの緩和速度は、太陽から望遠鏡が隠れてから数分程度の遅れを持ちながら冷却されること。 である

そこで、上記の知見をもとに、本事業で試作した凹面鏡の上記ヒーターを用いた加熱実験を行った。ヒ ーターの配置は、図25と同じである。

最初に、ヒーターをオンにしてからの温度上昇に伴う変化を評価した。その昇温過程における波面歪みの様子を示したのが、図29の干渉縞と波面データである。それぞれの左の干渉縞のずれから、凹面鏡を支えている治具の軸が少しずつずれていく様子が見えている。これに対して、右に示した波面の形状はほとんど変化しておらず、図27に示した石英の場合に比較して、ここでも熱歪みがほとんど見られないことから、この素材の全面加熱に対しても高い耐歪み特性が理解できる。



(a) 1 分後





(b) 2分後





(c) 3分後







(e) 5分後



(f) 9分後 (治具表面温度:63度)



- (g) 11分後 (治具表面温度:80度)
- 図29 新規セラミック凹面鏡の全面加熱過程での波面歪み







(b) 2分後



(c) 3分後



(d)4分後(治具温度:45度)



(e)6分後(治具温度:40度)

図30 新規セラミック凹面鏡の全面自然冷却過程での波面歪み

このことは、図30に示した一連の冷却過程における波面の変化に関しても示されている。左の干渉縞のパターンの変化に対して、右の波面のデータの差異が少なく、この程度の加熱では熱歪みが起こらないということになる。

3-5 熱真空試験

光産業創成大学院大学では、大型の真空チャンバーと熱源を用いた熱真空試験がこれらの2つのミラー母材に対して行われた。上記の実験のように石英では行っていない。本事業にて用いられた新規セラミック材とショット社のゼロデュアの2種類である。本事業における共同研究の元に、データの開示をいただいた。図31がその実験装置の構成を示した図である。真空チャンバーとしてのシュラウド内に設置したミラーに対して、外部から太陽光によるエネルギー



図31 真空チャンバーとしてのシュラウド内に設置し たミラーに対して高出力のホットプレートを配置



図32 実際の真空チャンバー内部に設置したミラーの様子

光学ミラー(2種)



図33 温度変調の行程図

流入量と同じ量の熱を与えることができるホットプレートからの輻射熱を照射し、それぞれのミラー母材な どの温度情報を評価しがら、熱周期をかけた。図32には、実際に用いチャンバー内部に設置したミラー の様子を示している。図33には、実際に掛けられた熱周期の概念図である。ヒーターのオンオフによって -20度から40度までの間を数日にわたって連続実験を行った。これも1年間行うことで、実際の宇宙環境 と同等の結果を得ることができるが、そこまでの繰り返しは行っていない。

数日間の熱真空試験の結果として、図34に示したようなミラー母材の状況であった。図32の右の写真 のときの初期状態と比較しして基本的にはまったく色の変色もなく、構造の歪みも見られず、安定した状 態であることがわかる。このことから、衛星本体内で予想される温度範囲では、これらの新規セラミック材 料とゼロディアの温度歪みや真空における熱周期によるダメージは少ないものと判断できる。



図34 数日におよぶ熱真空試験後のミラー母材



図35 光産業創成大学院大学に設置された熱真空試験装置

図35には、光産業創成大学院大学に新たに設置された熱真空試験装置の外観写真である。内径がお よそ300 φ あり、本事業で作製したミラーなどを内蔵させて、真空試験などが行うことができる。さらなる特 徴としては、窓材を介して、内部にレーザー光を導入することができるため、熱真空試験中に内部に設置 したミラーに対して光学的にアクセスが可能となっていることである。まだこの装置には、熱源が付いてお らず、熱試験までは今年度でおできていないが、今後の共同研究において継続する予定である。 3-6 放射線照射実験

宇宙環境の大きな特徴として、 宇宙線による放射線損傷がある。 光学部品でもこれらの放射線によ りさまざまな問題が起こりうる。主に ガンマー線によって素材の構造欠 陥が増え、そのために色がついた り、ミラー面と母材との間が剥離し たりする可能性がある。そこで、光 産業創成大学院大学に依頼して、 他の実験に合わせて、図36に示





光学ミラー(SiC)黒色光学ミラー(セラミック)透明図36放射線照射実験用ミラー母材

す2種類の凹面鏡の母材の放射線試験を行った。1つは本事業の凹面鏡の母材として用いたセラミック 材料(左写真)であり、もう1つは前述のようにショット社のゼロデュア(右写真)である。これらのミラー母材 を光学マウントに付けたままの状態で、コバルト60の放射線環境に設置させ、宇宙空間と同等のガンマ ー線量の照射を行った。国際宇宙ステーションの飛行する地上から400kmの軌道上では、生体に対して およそ1mSv/日の照射があると計測されており、ガンマー線が主体だと考えると1日あたり1mGy に相当 する。よって、表4に示した放射線量は、10万日の放射線量に対応する。図37には、この量のガンマー 線照射を行った後のミラー材の様子を示している。

表4 ガンマー線照射条件と観測内容





図37 ガンマー線を100Gy 照射後の各ミラー母材

光学的な透過率の変化や着色や素材がもろくなるなどの変化は全く観測されておらず、通常の宇宙環境の放射線量であれば、問題なく機能することが推測できている。太陽フレアーによる瞬時の大量照射な

どの実験はできないが、比較的安定しているものと推定する。その際には、回路系が破壊されるので、ミラ ーだけ安定している意味もないとは思われる。

3-7 振動解析

光産業創成大学院大学より、すでに行った解析に関しての情報を一部いただいた。図5で示した構造の宇宙ミラーと画像読み出し部を接続した構造が図38の左の図であり、その構造から求めた振動における応力集中の3次元解析データが右図である。構造のパラメータから解析的に得られた応力分布図から



図38 光産業創成大学院大学にて設計した望遠観測ユニットの構造案と、その 振動解析を行って得られた3次元応力分布

は、凹面鏡の付いている部分の留め金にかなりの力がかかっていることが赤く示されている。この解析では、凹面鏡の母材には、とくにリブ構想を用いておらず凹面鏡の重量もおよそ1kg であるとして解析していることに起因すると思われる。本事業での提案のように彫り込み構造を用いて凹面鏡を軽量化することで、この図にあるような応力も低減でき、打ち上げ時の振動による破壊の可能性も低くできる。

3-8 特許事項

本事業において、2つほどの特許項目を検討しているが、当社では凹面鏡そのものの特許を保有する 意味合いも少ないため、ミラー加工業者と宇宙関連大手に特許の検討をお願いしている。

1つはセラミック構造に起因した構造材の取り込みに関してと、もう一つは、セラミック構造内の温度安定 化を目指して構造材を入れ込むことに関してであり、現時点では両者とも検討中である。

3-9 まとめ

従来の宇宙用望遠鏡の光学材料は、石英ガラス系および SiC 系の凹面鏡を用いており、破損し易い特 徴であり、シリコン・カーバイド(SiC)は重量も重く、さらには宇宙環境における高温から極低温までの熱周 期に対して熱膨張の点で画像歪みに弱い性質の素材であることが指摘されている。一方、セラミックは、 スペース・シャトルの耐熱素材に用いられているように、高い熱性能を有する。そこで、今回は、新規セラミ ック素材に着目し、その熱特性、重量、耐振動性などを考慮して大型の望遠鏡に使用できることを確認で きれば、世界市場に対して望遠鏡を含む衛星を売り込みできる。

以上のことから、本事業における目的であった人工衛星搭載用の望遠鏡用凹面鏡には、

(1) 人工衛星打ち上げ時の振動に強い。(H2A 型ロケットを想定)

- (2) 衛星の周回に対応して、熱負荷が大きいため熱膨張も少なく熱特性が安定している。(400 km の軌道を想定)
- (3) 軽量であればあるほどよい。(1kg 以下を想定) といった性能が求められる。

このような要求に対して、本事業において新規セラミック凹面鏡を他の素材との性能比較検討を行い、 今回のセラミック素材は、SiC に比較して密度が他の低熱膨張素材程度に低いために、凹面鏡の軽量化 にむき、さらに熱膨張が少ないことから、超小型衛星に仕立てたときの宇宙環境における温度差(-20度 から50度程度)に対応がよいことが期待された。さらに、今回の事業では残念ながら実証に名足らなかっ たが、彫り込み構造などを用いることで、十分軽い凹面鏡が開発可能であり、その結果として打ち上げコ ストの大幅な低減化が可能であることがわかった。ただし、本事業のひとつの目的であった凹面鏡の裏面 にリブ構造や冷却構造の導入により、機械的な強度の向上と軽量化と熱均一化などを同時に狙うことを 目論んだが、国内の本新規セラミックの加工技術がまだ確立しておらず、鏡面研磨にも2ヶ月程度の時間 が要することもわかり、実際にリブ構造を作り上げるに至らなかった。ただ、ミラー製造業者との議論のな かで、本事業で用いた新規セラミック素材は、現在も加工技術が進歩をしている状況であり、ここ数ヶ月で リブ構造の初期作り込みや、機械的強度をあげるための構造材の導入、さらには冷却構造の組み込みが 可能であり、それらを含めた素材の作製単価が、いずれの場合でも100万円以下で製造可能で、事前に 凹面の作り込みも可能となり、研磨期間も短縮可能であるという結論に至った。

そこで、口径20cm のサイズの凹面ミラーを新規セラミック材料にて作り、その表面にアルミを蒸着し、凹 面鏡としての光学性能を評価した。コーティング素材として、紫外線に強く、紫外線から可視光、さらには 近赤外線領域でも高い反射率を有するアルミを用い、コーティング材とセラミック材との相性を確認した。 実験的に、凹面鏡部に温度負荷をかけて熱歪みを発生させ、その量が、従来の石英の凹面鏡と比較し て、定量的に宇宙用の素材として優れていることを証明できた。

また、光産業創成大学院大学との共同研究において、本事業に採用したセラミック素材の熱真空試験 と放射線照射試験を行い、そのいずれにおいても、高い信頼性のもとで1年間の宇宙環境では問題がま ったくないことを実証できた。

以上のように、宇宙望遠鏡用の新規凹面鏡として本事業にて探索し、試作した新規セラミック素材は、さまざまな面からの議論と実験から、宇宙環境に対して十分使用可能であることがわかり、その結果を受けて、今後は市場開拓を進めると同時に、この凹面鏡の量産化を進める。その際には、現時点で推測されている100万円の導入価格から、さらに下げていく努力はしていかねばならない。それは、超小型人工衛星をどれだけ生産し、海外に売り込んでいけるかにかかっており、当社のみではなく、政府などの動きに呼応して進めていきたい。

平成22年 度財団法人しずおか産業創造機構 『試作・実証試験助成金事業』 宇宙ミラー 事業実績報告書 平成23年度4月 株式会社 TAK システムイニシアティブ