

静止地球観測衛星用 SiC 鏡

(2003年～現在)

静止衛星は常時地球上の同じ位置にとどまるため、リアルタイムの地球観測を可能にできる可能性がある。しかし、静止軌道の高度は36000kmと高く、数10mの地表分解能を実現するためには口径1～数mの大型の望遠鏡を使用する必要がある。これまで、このような望遠鏡の主鏡^{注1}はガラスが用いられてきたがその質量は数100kgにもなり、衛星の質量や開発コストの増大につながる。たとえば、ハッブル宇宙望遠鏡の2.4mの主鏡の質量は830kgにもなっていた。高強度反応焼結SiCは、熱伝導度、ヤング率が高く、ガラスに比べ熱的な安定性が高い。また、曲げ強度、破壊靱性値が大きく、ガラスに比べ数分の1の質量の反射鏡が実現可能になる。また、気孔がなく、ガラスと同じように研磨が可能という特徴を持っており、これからの宇宙用の大型望遠鏡の有望な素材である。

1. 製品適用分野

人工衛星搭載用光学センサ、人工衛星搭載用光学系、大型天体望遠鏡

2. 適用分野の背景

人工衛星を使った地球観測は、1972年に有名なランドサット1号機が打ち上げられて以来、種々の光学カメラが開発され、研究だけでなく実利用に供されてきている。現在、気象衛星ひまわり6号の気象カメラによる雲画像が日に何度と天気予報を通して我々の眼に触れている。気象衛星のカメラの地表分解能(1画素の大きさ)は1kmと雲の識別が可能なサイズに設定され、宇宙から見た地球の全体の画像を1時間おきに地上に送ってきている。台風が日本に近づいたときには、30分に1枚の速さで撮像している。一方、地表分解能が約1mから20m程度の高精細の画像は、スポットイメージャ社やスペースイメージング社が市販していて誰でも買うことができるようになってい

る。インドネシアの大津波のような大きな災害が起きた場合などには、その前後の画像から被害状況の確認が行われたりしている。しかし、これらの衛星は、高度1000km程度の低い軌道を飛んでいて、1日15周程度地球の回りを回っている。人工衛星は一定の軌道を飛翔し、その間、地球が自転するため15周の軌道はほぼ等間隔で、赤道上で2700km程度の間隔になる。衛星高度からの見通し距離は500km程度であるため、通常5～20日程度で元の位置に戻るよう軌道を選定する。また、雲があると地上の観測ができないため、実際に同一地点を観測しようとしても、数週間から数ヶ月必要とされ、リアルタイムとは程遠いものである。空間分解能が10～50mぐらいで気象衛星のように静止軌道から撮影することができれば、ほぼリアルタイムで災害監視ができるようになる。またこのような画像で船の航行をモニターできるようになると不審船や海賊船の監視が可能となり航海の安全に寄与できる。このようなカメラが、なぜまだ実現されて

Key-words：光学ミラー、シリコンカーバイド、宇宙用望遠鏡

注1 反射望遠鏡の最初に光を集める鏡。一次鏡と呼ぶこともある。望遠鏡でもっとも大きな鏡になることが多い。

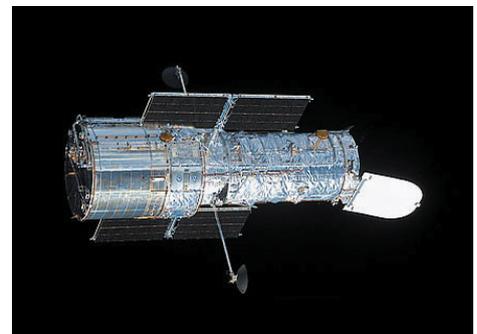
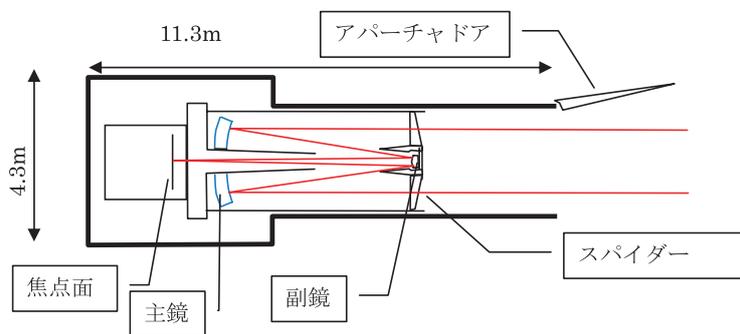


図1 ハッブル宇宙望遠鏡と光学系

軌道上のハッブル宇宙望遠鏡。ハッブル宇宙望遠鏡は衛星全体が大きな望遠鏡になっていて、その中心となるのは、直径2.4mの主鏡である。主鏡で集められた光は、副鏡で反射され焦点面に像を結ぶ(写真はNASAから公開されているものである)。

注2 2乗平均誤差 (Root Mean Square) のことで、誤差の大きさを示す指標のうちのひとつ。

注3 熱膨張係数が 10^{-6} より小さいガラス材料を低膨張ガラスと呼ぶことが多い。特殊な配合のガラスや、ガラスの一部を再結晶させたガラスセラミックスが実用化されている。

注4 化学的気相成長 (Chemical Vapor Deposition) の略で反応炉内で加熱した基盤物質上に、目的とする薄膜の成分を含む原料ガスを供給し、基盤表面あるいは気相での化学反応により物質を堆積する方法である。化学蒸着と呼ばれることもある。

いないのであろうか。それは、光が波の性質を持ち、回折という現象によって見分けられる角度に制限があるためである。望遠鏡の開口径を D 、光の波長を λ とすると $2.44 \lambda / D$ (rad) が見分けられる限界の角度を与える。静止衛星の高度は $h=36000\text{km}$ あり、そこから $d=20\text{m}$ の物体を見分けようとする、 $h/d=0.6 \mu\text{rad}$ (0.1 秒角) の角度を分解しなければならない。光の波長は大体 $0.5 \mu\text{m}$ なので、 $D=2.4 \text{m}$ の開口径の望遠鏡が必要とされることがわかる。すばる望遠鏡をハワイに作る以前は、わが国最大の天体望遠鏡として岡山天文台にある口径 1.88m が長い間使われてきたことを考えると、このような望遠鏡を衛星に積んで打ち上げることの大変さが理解いただけると思う。しかも、光を集めて良好な像を作るためには、反射鏡の形状誤差を波長の $1/10$ (数 10nm) 程度、面の粗さを 1nm RMS (注2) 以下に保つ必要がある。鏡を地球の大きさに拡大した場合、道路の縁石程度の誤差しか許されず、砂利道程度の面粗さ以下にするという非常に高度な技術が必要とされる。しかし、口径 2.4m の望遠鏡はすでに、宇宙空間に打ち上げられ使用されている。ハッブル宇宙望遠鏡 (図1) である。

3. ガラスから SiC へ

ハッブル宇宙望遠鏡は 1990 年にスペースシャトルで宇宙空間に運ばれて以後、何度か軌道上で修理を受けながら、17 年間にわたって素晴らしい観測データを送り続けている。ハッブル宇宙望遠鏡に使われている望遠鏡の反射鏡は ULE という低熱膨張ガラス (注3) が用いられていて、図2の様の中をくりぬいたハニカ

ム構造と呼ばれる構造をとっている。人工衛星に搭載するということは、地球重力化で組み立てられ無重力空間に運ばれるということであり重力によって、望遠鏡全体だけでなく、鏡そのものの自重変形が無視できなくなる。重力の影響や全体の軽量化のために、構造的に影響を与えない様にガラスの内部をくりぬいているのである。その結果、ハッブル宇宙望遠鏡の主鏡は 830kg の質量に軽量化されている。それでも、軽自動車1台ぐらいの質量があり、この鏡を安定にかつ高精度に支え、ロケット打上げの振動と衝撃に耐えるために、衛星全体で 11トン もの巨大な衛星になっている。

このような、宇宙用の望遠鏡をさらに軽量化できる可能性のある素材が SiC である。ULE 等の低膨張ガラスは、 $3 \times 10^{-6} (\text{K}^{-1})$ 程度と SiC の $2.5 \times 10^{-6} (\text{K}^{-1})$ に比べ約 $1/10$ の線膨張係数が得られていて、熱的に安定しているように見える。しかし、実際に望遠鏡がおかれる環境では、周囲の温度変化による熱の出入りが起きる。この場合、SiC はガラスに比べ熱伝導度が 100 倍以上大きく、鏡の部分ごとの温度むらも $1/100$ 以下になる。その結果 SiC の鏡の熱歪は低膨張ガラスに比べ小さくできることになる。また、比剛性と呼ばれる (ヤング率/密度) というパラメータも SiC のほうが数倍も大きく、同じ構造をとった場合には軽量の反射鏡を作ることができる。SiC はこのような特性から大型の反射鏡として最適な材料であり、直径 1m で 80kg 以下、直径 2m で 200kg 以下の反射鏡が実現できると考えている。

4. 開発の現状

わが国最初の SiC ミラーを採用した宇宙用光学系は、2003 年に打ち上げられた小惑星探査機「はやぶさ」のレーザ高度計である。直径 13cm の小さな反射鏡であったが、小惑星「いとかわ」への着陸のため不可欠な機器として使用された。また、2006 年に打ち上げられた赤外線天文衛星「あかり」には直径 70cm の反射鏡が使われた。これらは、SiC の鏡としては大きな成功を収めたが CVD (注4) という製造に時間がかかる高価なプロセスで作られていてさらに大型化することは困難と考えられている。現在開発中の高強度反応焼結 SiC による反射鏡の製造方法を図3に示す。カーボンと SiC 粉の材料を混合した後、冷間等圧加圧法によって固体の成型体をつくる。成型体は固体とは言っても軟らかく機械加工が可能で容易に製品に近い形状を作ることができる。その後、焼成炉でシリコンを溶浸し、材料粉のカーボンをシリコンと反応させ SiC とすると同



図2 ハッブル宇宙望遠鏡の主反射鏡

ハッブル宇宙望遠鏡の主鏡は、ハニカム状にくりぬいたガラスの上下に薄いガラス板を特殊な方法で溶着した軽量化構造を採用しているが、 830kg の質量になっている (写真は NASA から公開されているものである)。

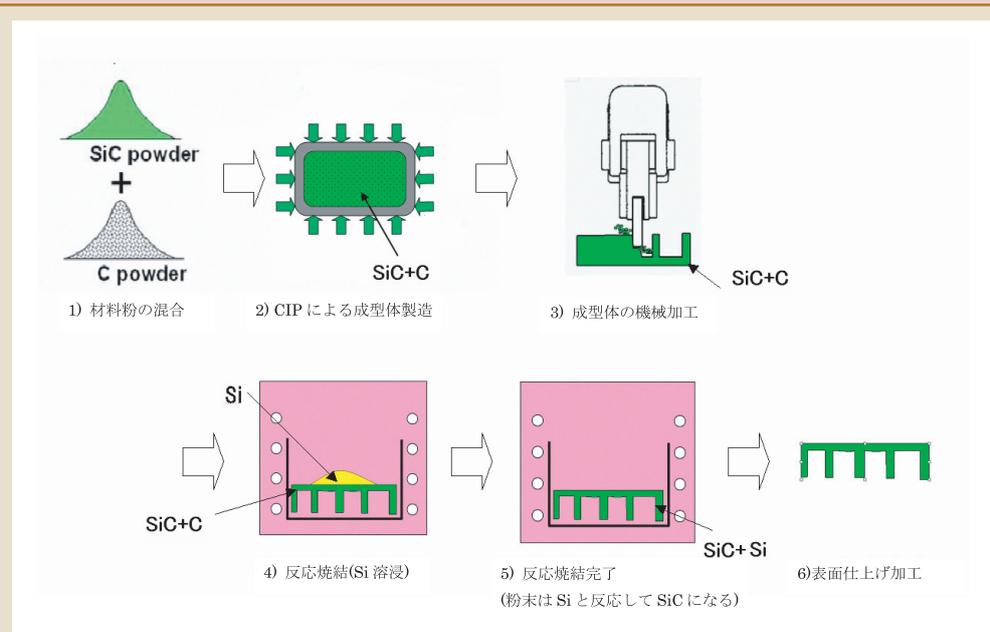


図3 高強度反射鏡母材の製造方法

反応焼結 SiC の製造プロセス。

時に余剰のシリコンで気孔を埋める。焼成した製品の表面を研削仕上げる。出来上がった素材は緻密で、気孔が無いので、表面を直接研磨して、鏡面に必要な形状と面粗さの面が得られる。

図4は試作した直径500mmの球面鏡、直径650mmの平面鏡である。

現在、高強度反応焼結SiCを用いた大型軽量化反射鏡母材は、鏡面の厚さ3mm、背面のリブの厚さ3mm、リブの高さ100mmの制約のなかで製造可能である。1200mmの製造設備の制約の中で、種々の形状のものが製造可能になりつつあり、地表分解能40m程度の静止地球観測用センサの実現が可能なレベルに相当している。

ハッブル宇宙望遠鏡クラスの反射鏡を作ることを目指して、1m程度の鏡を接合して大きな反射鏡を作る研究や、さらに軽くするために薄い構造とする研究を進めている。

[連絡先] 津野 克彦
NEC 東芝スペースシステム(株)
光学センサグループ
〒183-8551 府中市日新町1-10

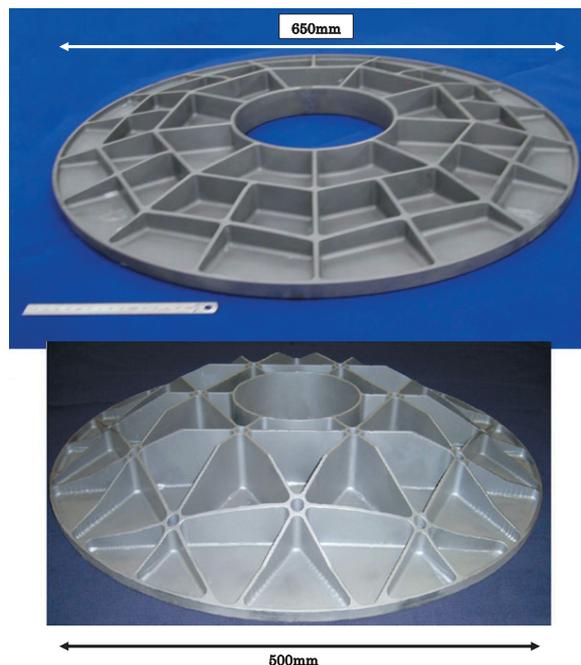


図4 SiC 反射鏡

試作した高強度反応焼結SiCの鏡面母材^{注5}。上は直径650mmの平面、下は直径500mmの球面用の母材である。

注5 反射鏡は鏡面母材の表面を研磨して製作する。研磨する前の材料を母材と呼ぶ。