

報告番号	甲 第 13145 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 繊維配向角誤差に起因する CFRP 製リフレクタの面外熱変形に関する研究
(Study on the Out-of-Plane Thermal Deformation of CFRP Reflectors Due to Fiber Orientation Error)

氏 名 田中 駿

論 文 内 容 の 要 旨

高解像度、高分解能の宇宙望遠鏡を実現するためには、大型で形状精度の高い反射鏡（リフレクタ）が不可欠である。宇宙望遠鏡はロケットにより宇宙空間に打ち上げる必要があるため、ペイロードを削減する必要から徹底的な質量軽減が求められる。そのため、宇宙望遠鏡の質量の大部分を占めるリフレクタの質量軽減は至上命題である。また、宇宙望遠鏡が運用される宇宙空間において、リフレクタは厳しい温度変化にさらされる。したがって、宇宙用リフレクタの材料には軽量、高弾性率、低熱膨張率の特性が求められる。

炭素繊維強化プラスチック（carbon fiber reinforced plastic, CFRP）は、高比剛性、低熱膨張の性質から次世代のリフレクタ材料として期待されている。しかし、温度変化に対する CFRP 製リフレクタの形状安定性を調査した結果、予想外かつ宇宙用リフレクタへの適用に際して無視できない大きさの面外熱変形（反り）が発生するという問題点が明らかになった。さらに、その原因を調査した結果、CFRP 積層板の製造誤差に起因する炭素繊維の配列方向の誤差（繊維配向角誤差）の影響が無視できないことが明らかになった。

製造誤差に起因する繊維配向角誤差は避けることができない。したがって、宇宙用 CFRP 製リフレクタを実現するためには、これに起因する面外熱変形を抑制する必要がある。そのための手法として、CFRP 積層板を表皮とし、内部にコアと呼ばれる材料を挟み込むことでサンドイッチ材とすることによりリフレクタの剛性を高めることや、アクチュエータにより外力を与え、リフレクタの形状を補正すること等により、繊維配向角誤差がリフレクタの面外熱変形に与える影響を抑制することが考えられる。しかし、これらの手法はリ

フレクタ構造の質量増加を招くため、徹底的な質量削減が求められる宇宙望遠鏡においては望ましい対策とは言えない。

そこで、本研究では CFRP 積層板自体の内部構造である、積層数や積層順序、各層の繊維配向角度の設計値といった積層構成を工夫することにより、繊維配向角誤差が CFRP 積層板の面外熱変形に与える影響を和らげることを考えた。これは、CFRP 積層板の質量増加をもたらすことなく、繊維配向角誤差に起因する CFRP 積層板の面外熱変形を本質的に抑制することができるため、宇宙用リフレクタの至上命題である質量軽減の観点から最良の対策であり、これについて検討することは極めて重要である。

本論文は CFRP 製リフレクタの実用性検証のために実施した CFRP 製リフレクタ模型の面外熱変形測定実験と、それにより明らかになった予想外の面外熱変形に関する原因の調査、さらに積層構成を最適化することにより繊維配向角誤差に起因する CFRP 製リフレクタの面外熱変形を抑制する手法に関する研究の成果をまとめたものであり、以下の五つの章から構成されている。

第 1 章では、高精度宇宙用リフレクタの材料としての CFRP の利点と、宇宙望遠鏡を含む各種宇宙観測装置における CFRP の利用例、さらには近年の宇宙用 CFRP 製リフレクタの実現に向けた研究について述べた。また、宇宙用 CFRP 製リフレクタの実現にあたっての問題点である形状不整を抑制するいくつかの手法に関して概要をまとめ、その一つとして CFRP 積層板の積層構成を工夫することの有用性について述べた。さらに、研究の目的と本論文の構成について述べた。

第 2 章では、CFRP 製リフレクタの実用性を議論するにあたって不可欠である、温度変化に対する形状安定性について調査するため、擬似等方対称積層板によりリフレクタ模型を製作し、これに生じる熱変形を測定する実験を行った。CFRP 積層板を構成する各層における炭素繊維の配向角が上下対称である場合、理論上、顕著な面外熱変形は発生しないと予想される。それにもかかわらず、実験の結果、リフレクタ模型全体が鞍型に変形するような予想外の面外熱変形が発生することを明らかにした。また、実験により観測された面外熱変形が宇宙用リフレクタへの適用にあたりどの程度の問題を引き起こすかについて検討し、高精度宇宙用 CFRP 製リフレクタの実現のためにはこの面外熱変形を抑制する必要があることを示した。

第 3 章では、実験により明らかになった CFRP 製リフレクタ模型の予想外の面外熱変形について、その原因を調査した。観測された面外熱変形の分布から、積層板の製造誤差による積層の非対称性の存在が疑われたことから、積層板を構成する層のうちただ一つに対し、小さな繊維配向角誤差を与えた場合に生じる CFRP 製リフレクタ模型の面外熱変形を調査した。その結果、わずかな繊維配向角誤差であっても、実験で観測されたような顕著な面外熱変形を引き起こすことを明らかにした。さらに、各層にランダムな繊維配向角誤差が存在する場合に生じる CFRP 製リフレクタ模型の面外熱変形についてモンテカルロ法を用いて調査し、技術者が慎重に積層作業を行った場合でも避けられない標準偏差 0.4° の

繊維配向角誤差により、実験により観測されたものと同程度の面外熱変形が発生することを明らかにした。これらの結果から、高精度宇宙用 CFRP 製リフレクタを実現するためには、避けることができない製造誤差に起因する繊維配向角誤差が面外熱変形に与える影響を抑制することが必要であることを示した。

第 4 章では、繊維配向角誤差に起因する CFRP 製リフレクタの面外熱変形を抑制する方法の一つとして、積層構成を最適化することについて検証した。はじめに、擬似等方積層の範囲内で CFRP 積層板の積層数や積層順序を変更することにより、CFRP 製リフレクタ模型に生じる面外熱変形がどのように変化するかについて調査した。その結果、板厚を一定とした場合、積層数を増加させる、すなわち可能な限り薄いプリプレグを使用することや、異なる繊維方向の層が隣り合うように積層することにより、繊維配向角誤差に起因する CFRP 製リフレクタ模型の面外熱変形を抑制することが可能であることを明らかにした。特に、後者の結果は擬似等方積層の範囲にとどまらず積層構成を最適化することにより、CFRP 製リフレクタ模型の面外熱変形をさらに低減できる可能性を示唆するものであった。

続いて、積層構成最適化の第一歩として、繊維配向角誤差に起因する CFRP 平板の面外熱変形の最小化について検討した。そのために、古典積層理論に基づき、ランダムな繊維配向角誤差により生じる CFRP 平板の面外熱変形を解析的に評価する手法を考案した。この評価手法を用いて、面外熱変形が最小となる積層構成を遺伝的アルゴリズムにより探索し、最適な積層構成を採用した場合、積層数 8 および 16 の平板について、面外熱変形量をそれぞれ 30%、16%程度抑制できることを明らかにした。

さらに、擬似等方積層と最適積層構成を持つ CFRP 積層平板をそれぞれ製作し、これに生じる面外熱変形を測定する実験を行い、最適積層構成を採用することにより繊維配向角誤差に起因する面外熱変形を抑制可能であることを実証した。

最後に、実際のリフレクタ等、特定の寸法および形状を持つ対象における積層構成最適化の一例として、これまでの議論で取り上げてきたリフレクタ模型の積層構成を最適化した。この最適化に際し、CFRP 平板の最適積層構成を初期値として用いた。これにより、8 層の CFRP 積層板により構成されるリフレクタ模型の最適積層構成を採用した場合、擬似等方積層の場合と比較して、繊維配向角誤差に起因する面外熱変形がリフレクタの性能に与える影響を 25%程度抑制可能であることを明らかにした。さらに、この結果から、実際の高精度宇宙用 CFRP 製リフレクタを実現するにあたり、積層構成を最適化して繊維配向角誤差の影響を抑制することは、要求される形状精度の水準を満たすために極めて有用であることを示した。

第 5 章では本論文で述べた研究成果を総括するとともに、本研究では明らかにすることができなかった今後の課題について述べた。