

1G15 熱変形精密評価のための高精度測定系の構築

○神谷友裕, 宇都宮真, 清水隆三 (宇宙航空研究開発機構)

Development of precise measurement system for thermal deformation of spacecraft structures
Tomohiro Kamiya, Shin Utsunomiya and Ryuzo Shimizu (JAXA)

Key Words: Precise Measurement System, Thermal Deformation, Spacecraft Structures

Abstract

Future missions such as a geostationary earth observation with high spatial resolution require extremely high observation performance. Satellite structures should be designed to be stable against the thermal disturbance on orbit to realize these missions. Thermal stability of structures should be demonstrated through ground test before launch. In this paper, we introduce the research and development of precise measurement system for thermal deformation of spacecraft structures.

1. 目的および背景

近年の異常気象による災害の多発や、近い将来の巨大地震の発生予測などの状況から、「国土強靱化」「災害に強いまちづくり」が社会的に重要なテーマとなっており、東日本大震災のような巨大リスクに備えた「防災や減災対応の強化を含めた安心安全の確保の要請が高まっている」¹⁾。特に、大災害時には地上インフラが壊滅的なダメージを受けることから、宇宙からの観測は状況把握に有効な手段であると考えられている。人工衛星を用いた災害時の被災状況の詳細な（高分解能な）観測や、軌道周回タイミングに依らない継続的な常時観測は、社会的に重要なインフラである。

この社会インフラ実現を目指して、高分解能観測や常時観測のために検討されている高精度観測衛星では、従来を大きく上回る高度な観測性能が必要とされている²⁾。観測センサや衛星構造の変形に起因する光軸ブレや位置ズレに対して厳しい要求があり、秒角オーダーの非常に高度な構造の安定性が求められている。高精度な観測衛星において、軌道上の熱環境の変動に起因して観測センサや衛星構造体に発生する熱ひずみが、観測性能に影響する大きな問題となっており、観測の誤差要因の大半を占める可能性がある。一般的な低軌道周回衛星を用いた地球観測について、観測誤差の要因を分析した一例を表1に示す。具体的な数値は機微な情報であるため、ここで明示することは避け、各検討例における各要因の寄与度の大・中・小で示す。この配分はミッションや衛星の構成により異なるが、熱変形が観測誤差の主要な要因となっていることがわかる。

表1 地球観測衛星における誤差要因分析の例

誤差要因	検討例1	検討例2
製造・組立誤差	大	小
熱変形	大	大
重力効果	小	小
脱湿変形	小	小
打上変形	中	小
展開誤差	小	小
振動擾乱	(考慮せず)	大
その他	小	小

この熱変形の問題を解決するために、高度な熱的安定性が求められる観測センサや衛星ミッション部の構造には、熱膨張率が極めて小さい素材（熱膨張率： $10^{-7}/K$ オーダー）が用いられており、設計・解析上は極めて高い熱的安定性を実現しつつある。しかし、数mサイズの立体的な構造体である観測センサやミッション部の構造全体で、その極めて小さい熱変形（ μm , arcsecオーダー）を実際に正確に評価することは技術的に非常に難しく、衛星開発の試験検証において苦慮している実情がある³⁾。次世代のより高精度な観測衛星を実現するためには衛星構造の高度な熱的安定性が必須であり、その安定性を地上試験で高精度に評価する手法が求められている。

本稿では、衛星開発の地上検証試験において、衛星構造の熱変形を正確に評価するための高精度な測定技術について、JAXAで実施している研究を紹介する。

2. 熱変形測定試験における課題

衛星開発の試験検証における熱変形測定試験は、振動試験や熱真空試験のように試験方法がある程度確立されているわけではなく、共通的な試験手法・試験設備も存在していない。そのため、現状では衛星プロジェクトごとに試験の方法や測定系の構築を実施している。プロジェクトフェーズにおいては試験手法・測定設備そのものの高精度化に取り組む時間的余裕がなく、その時にできるレベルでの対応に留まっており、評価を困難にしている。

高精度な熱変形測定試験において共通的に課題となる技術的な項目として、以下の3点が考えられる。

- ① 測定機器の精度不足
- ② 測定治具自体の変形
- ③ 周辺環境の変動

熱変形を測定する機材として、従来からアライメント測定などに多用されている測量機器（フォトグラメトリシステムやセオドライトなど）や汎用の測定機器（レーザー変位計やオートコリメータなど）が一般的には用いられている。μm, arcsec オーダーの正確な変形評価が求められる状況においては、これらの機材では測定精度がやや不足している場合がある。また、熱変形測定試験では測定治具や周辺環境にも高度な安定性が必要となる。しかし、熱的に安定した共通的な試験設備が存在していないため、一般空調環境の試験室において通常の金属製治具を用いて測定が実施されている。熱変形測定試験の治具には組み立て治具やアライメント測定治具が転用されていることが多く、近年の衛星構造はきわめて低熱膨張に設計されているため、衛星構造体の変形よりも治具の変形の方が大きく、評価を困難にしている。また、数 m スケールの供試体全体の熱変形を正確に評価するためには、大気揺らぎや空間の温度分布などの周辺環境の変動も考慮に入れなければ評価が困難である。また、μm, arcsec オーダーの変形量では、接着層の変動や異種材料のフィッティング締結の影響など従来は無視することができた影響も考慮する必要があり、材料試験片レベルから、部材レベル、アセンブリレベルに至る熱構造特性を詳細に把握することが重要である。

今後の衛星開発における熱変形測定試験を円滑に実施するため、熱変形測定・評価に関する要素技術・ノウハウ・試験データを、リファレンスとなる共通文書（試験ハンドブック等）として共通的に展開・活用できるように整備することが必要である。

3. 高精度熱変形測定システム構築の構想

今後の衛星開発において、高精度な熱変形評価を定常的に実施するためには、共通的な試験手法・試験設備を確立することが必要であるが、それには大規模な設備投資が必要となる。よって、まずは個別の技術課題の解決から評価手法の確認と限定的なシステムによる実証までを本研究の範囲とし、共通試験設備の構築は、本研究結果の結果に基づいて次のフェーズで企画する構想である。図 1 に示すような一般的な衛星ミッション部の構造を単純化した構造を対象として、熱膨張率 $1 \times 10^{-7}/K$ 以下の熱的安定性で設計された立体的な構造体の熱変形の高精度評価を実証する。図 1 ではヘキサポッド構造の供試体を示しているが、供試体形状はミッションごとに異なるため、供試体形状に依存せず汎用的に適用可能な測定系・評価手法を構築することを目指す。

本フェーズにおける研究の出口は以下のとおりである。

- ✓ 熱変形測定に適した測定機器の選定、単体精度の検証、単体誤差要因の解明と補正方法。
- ✓ 熱変形測定治具に適した低熱膨張素材の選定、設計・製造技術と試作実証。
- ✓ サブシステムレベルのスケールの構造体を対象にした測定システムの構築と評価実証。
- ✓ 要素技術・ノウハウ・試験データの共通文書（試験ハンドブックなど）の整備

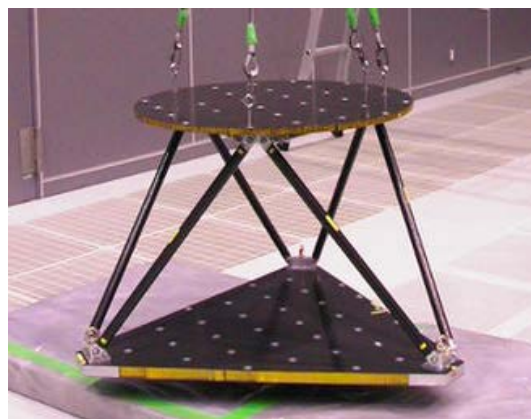


図 1 一般的な衛星構造を単純化した供試体の例

図 2 に従来の熱変形試験における問題点を表した模式図を、図 3 に本研究で目指す高精度測定系の模式図を対比させて示す。本研究では、測定機器の精度向上、測定治具の安定化（低熱膨張、振動絶縁）、周辺環境の安定化に取り組む計画である。

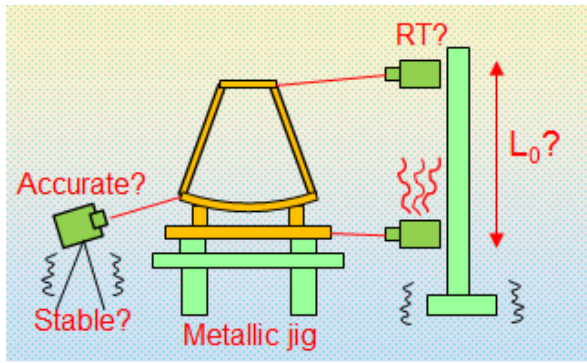


図 2 従来の熱変形試験における問題点の模式図

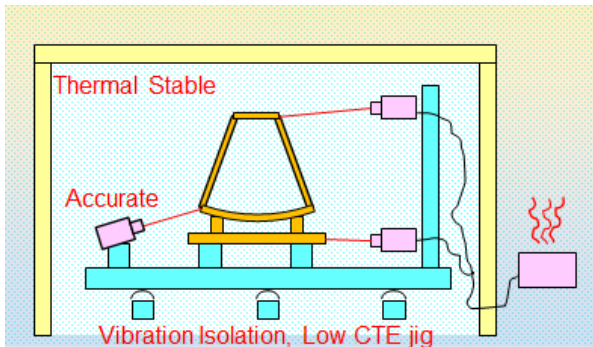


図 3 本研究で目指す高精度測定系の模式図

表 2 に、熱変形測定における測定誤差要因ごとの影響度を分析し、従来の測定方法における測定誤差量と本研究で目標とする測定誤差量を比較した一例を示す。この分析例では、図 4 に示すように、治具に片端固定で設置した供試体の長さ変化を自由端から測定する単純な状態を想定しており、供試体の固定端から測定機器までが 1.5m、変位測定部が 0.1m の測定コンフィギュレーションを仮定している。従来の測定手法における測定誤差要因として、測定治具の熱変形 (13.8 μm) が支配的な要因となっており、この熱的安定性が重要であることが分かる。ここでは測定治具として一般的に使用されているアルミニウム製 (熱膨張率 23ppm/K) を仮定している。本研究においては、低熱膨張材 (熱膨張率の目標 < 2ppm/K) を用いた測定治具と精密空調による温度コントロール (温度安定性の目標 < 0.2 $^{\circ}\text{C}$) により、この治具熱変形の影響を 0.6 μm 以下に低減することを目標としている。また、従来手法の測定機器として、汎用的に多用されている三角測量方式のレーザー変位計を用いた場合を仮定しており、機種や測定条件によっても変わるが、3 μm 程度の精度である。これをレーザー干渉計により測定することで、0.1 μm 以下の精度に向上させることを目標としている。

表 2 熱変形測定における測定誤差要因分析の例

誤差要因	従来	目標
測定機器精度	レーザー変位計 3.53 μm	レーザー干渉計 0.068 μm
測定治具熱変形	金属 (23ppm/K) 13.8μm	低熱膨張材 (< 2ppm/K) < 0.6 μm
周辺環境変動	一般空調 0.4 $^{\circ}\text{C}$	精密空調 < 0.2 $^{\circ}\text{C}$
地面振動	直置き 1 μm	空気浮上 0.1 μm
総合 RSS	14.3 μm	0.61 μm
目標	-	< 1 μm

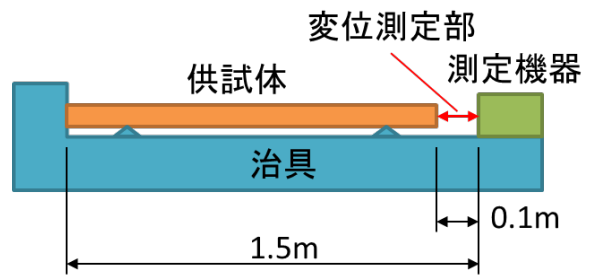


図 4 測定誤差要因分析のコンフィギュレーション

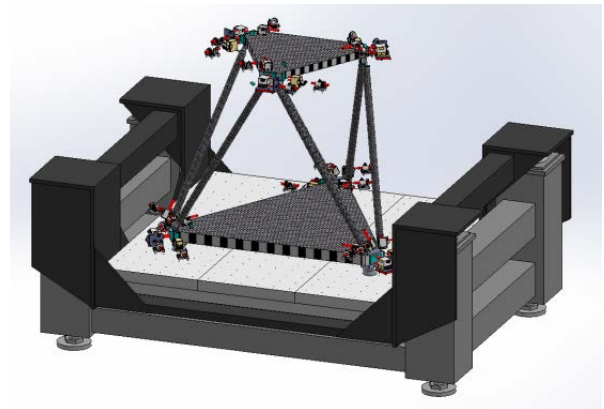


図 5 高精度熱変形測定の実証システムの概念検討

図 5 に高精度な熱変形測定システムの技術実証を行うための測定系の概念検討図を示す。低熱膨張材で構成された定盤と測定治具を用いて治具の熱変形を抑え、空気浮上除振台で支持することにより地面振動から絶縁し、この測定系を恒温恒湿室に設置することにより、精密な温度コントロールを行い、大気揺らぎや温度分布を抑え、高感度なレーザー干渉計を立体的に配置することで、任意点の変形を高精度に測定する構想である。

4. 現状の活動状況

本研究は、複数年に亘って実施する計画であり、現状ではまだ実施途中の段階であるが、本稿では現時点までの活動の状況を紹介する。

① 測定機器の精度向上

高精度な変位測定のために使用する測定機器として、他の測定方式と比較して分解能に優れ、比較的長い測定レンジを確保することができるレーザー干渉計を想定している。しかし、一般的なレーザー干渉計の光学素子は金属ハウジングの筐体を用いられており、一部には接着も使用されている。常時安定した同一の環境で使用する場合には比較的問題とならないが、供試体や空間の温度が変化する場合の可能性がある。熱変形測定試験においては、温度変化によりこの光学素子自体（金属筐体、接着部）が変動して変位測定に影響する可能性がある。よって、本研究では、光学部に金属が用いられておらず、素子自体の熱的安定性に優れた Monolithic 光学系を用いたレーザー干渉計の光学素子を用いることとした。図 7 に示す光学素子は、干渉光学系を構成するガラス材料を保持する部分（底面）も低熱膨張材料（インバー材）で構成されており、優れた熱的安定性を持っている。図 8 に、熱変形の精密測定の一例を示す。この測定例は、 1°C あたり $1\mu\text{m}$ 変位するように基準長と熱膨張率を調整された供試体を用いて、微小な温度変化による微小な熱変形を実測できるかを検証した際のものである。温度変化の幅としては PV で 0.1°C 程度の微小な変化であるが、温度変化と変位のプロファイルがほぼ完全に一致しており、理想的な状態であれば 0.01°C 、 $0.01\mu\text{m}$ のレベルで温度と変位の相関が明確に実測できることが確認できた。図 8 の変位データは、サンプリング間隔 1 秒、サンプリング長 6 時間の全データを平均化なしでプロットした結果であり、ノイズが非常に小さく無視できるレベルであることがわかる。また、変位測定だけではなく、角度測定の高精度化にも取り組んでいる。まずは現状把握のために、角度測定に多用されているオートコリメータについて、代表的な機種を用いて、安定性の比較検証試験を行った。比較した機種はいずれもカタログスペックがほぼ同等のものを用いている。図 10 に、安定した環境で固定された同一の対象を同時に測定した場合の長期ドリフト（静止安定性）の比較結果を、図 11 に高サンプリングレートで測定した場合の短周期ノイズの比較結果を示す。仕様値に有意な差がないにも関わらず、機種により

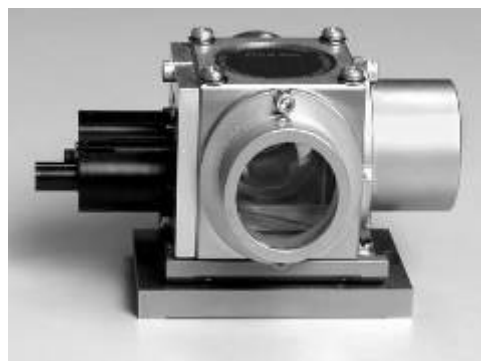


図 6 一般的なレーザー干渉計の光学素子

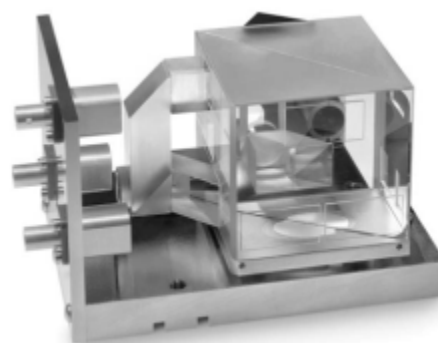


図 7 Monolithic 光学系を用いたレーザー干渉計の光学素子

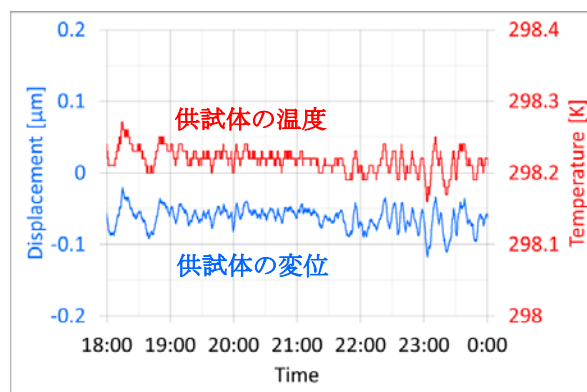


図 8 熱変形の精密測定の一例

長期ドリフト、短周期ノイズの特性に大きな差があることが確認された。また、いずれの機種においても、長期ドリフトの特性は、オートコリメータ本体の特性ではなく、それぞれの固定治具の特性の影響が支配的であることも確認できた。長期に安定した測定を実施するためには、オートコリメータの固定治具の安定化が重要である。短周期ノイズの特性は、機種により大きく異なることが分かった。これは機種ごとにサンプリングする方式が異なることが影響していると考えられる。

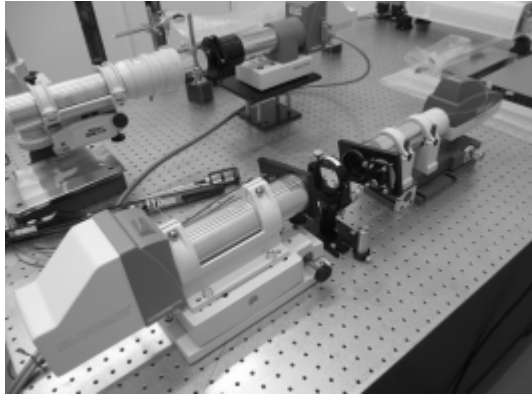


図 9 オートコリメータの特性比較

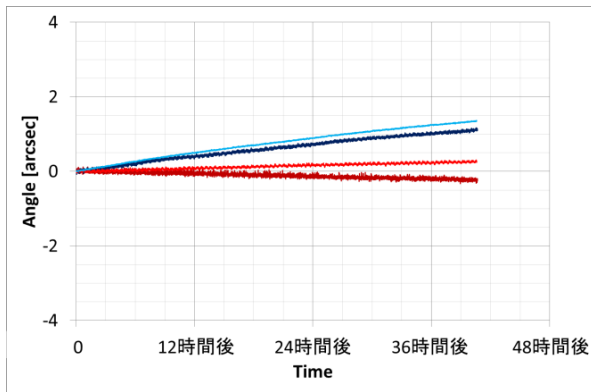


図 10 各オートコリメータの長期ドリフトの比較

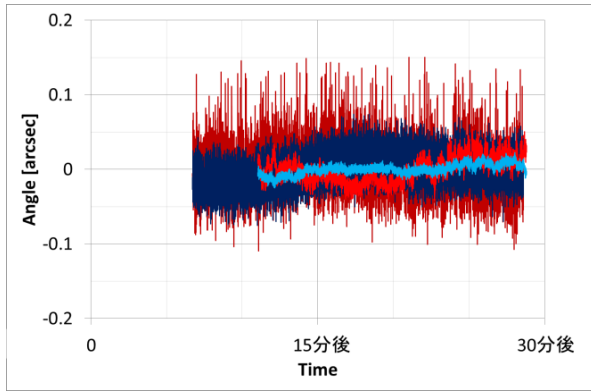


図 11 各オートコリメータの短周期ノイズの比較

② 測定治具の安定化

従来の熱変形測定試験では、低熱膨張に設計された衛星構造体の微小変形を測定する際に、金属製治具を用いていることにより、治具の熱変形が影響することが問題となっていた。そこで、測定系を構築する基準面となる定盤を低熱膨張素材で構築することを検討した。その材料選定として、精密測定治具に必要な特性である剛性、熱膨張率、長期安定性、製造性の観点で各種材料のトレードオフを実施した。トレードオフの結果、剛性と熱膨張率に優れており、

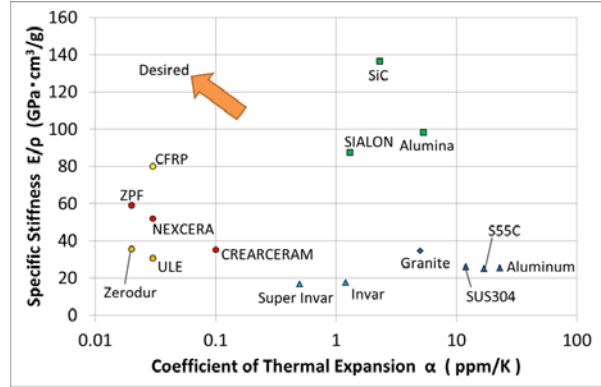


図 12 治具材料の剛性・熱膨張率のトレードオフ

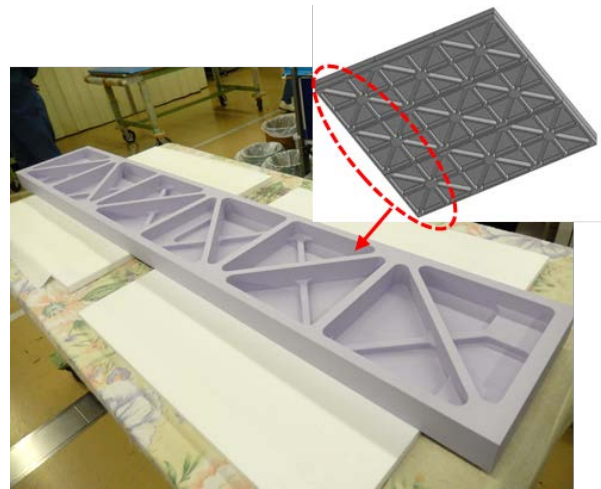


図 13 NEXCERA™ 製定盤の部分試作

表 3 NEXCERA™ 製定盤の部分試作品の物性

評価項目	試作結果
密度	2.49 g/cm ³
気孔率	0.00 %
弾性率	127 GPa
曲げ強さ	165.2 MPa
熱膨張率	-0.02 ppm/K (@23°C)

大気中の湿度に対する感受性がなく、長期の安定性に優れており⁴⁾、大型の治具が成形できる可能性のある極低熱膨張セラミックスNEXCERA™を選定して、低熱膨張大型定盤の製作を計画した。製造性の確認と、大型成形物での物性の実測評価を行うために、1/6 モデルの試作を行った。図 13 にNEXCERA™製定盤の部分試作結果を、表 3 にその試作品における物性の実測結果を示す。製造性および実測物性は非常に良好であった。特に熱変形測定治具として最も重要な物性である熱膨張率については、試作モデルの

複数点で複数方向に試験片を切り出して実測しているが、そのばらつきは最大でも $\pm 0.01\text{ppm/K}$ であり、均質で安定した板を成形することができている。試作モデルで製造性と物性が確認できたことから、フルモデルの設計・製造に着手している。図 14 に低熱膨張大型定盤の検討図を示す。治具の熱変形を抑えるためのNEXCERATM製大型定盤を、地面振動から絶縁するための空気浮上除振台に搭載している構成である。除振台は、低重心による安定化のために懸垂型の構造としている。

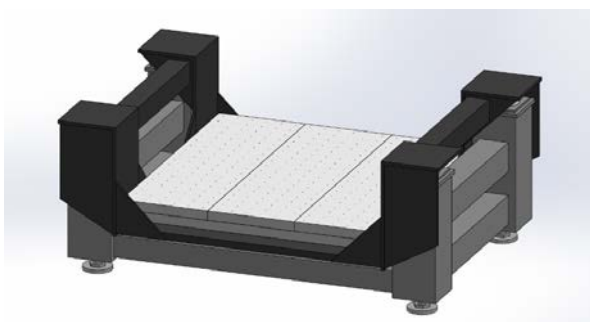


図 14 低熱膨張大型定盤の検討図

③ 周辺環境の安定化

外気温の季節変動・時間変動や建屋空調の変動の影響を受けることなく熱変形測定試験を行うために、二重の断熱壁で外気から隔離された恒温室を整備した。地面振動・建屋振動が恒温室内に伝達することを防ぐために、この恒温室は建屋床面に剛固定せずに防振ダンパにより支持されており、音響による加振入力を防ぐために防音構造となっている。清浄度が要求される機器が試験可能のように、クラス 10000 相当のクリーンルームにもなっている。図 16 にこの恒温室内の中央付近で測定した温湿度の安定度を示す。4 日間の測定において、温湿度の変動は PV で 0.15°C 、 $0.9\%RH$ であった。本恒温室は、通常時は常温常湿 ($23^{\circ}\text{C}50\%RH$) で運用しているが、試験条件に応じて、 $10\sim 40^{\circ}\text{C}$ 、 $20\sim 80\%RH$ までの範囲で、温湿度が任意に調整できる精密空調を導入している。

5. おわりに

衛星開発の地上検証試験で衛星構造の熱変形を正確に評価するための高精度な測定技術について、JAXA で実施している研究を紹介した。高度なミッションを実現するための衛星構造の安定化の要素技術研究を継続し、将来の新たな観測プロジェクトの創出に貢献していく予定である。



図 15 恒温・防振・クリーンルームの整備状況

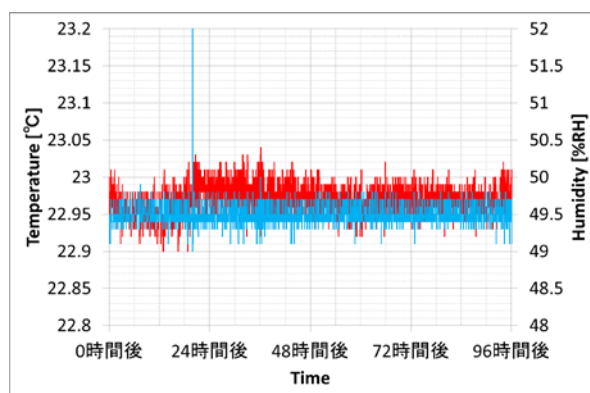


図 16 恒温・防振・クリーンルームの温湿度安定度

謝辞

本研究を実施するにあたり、極低熱膨張セラミックスを用いた大型定盤の実現に黒崎播磨株式会社の方々に献身的なご尽力をいただいている。ここに心より謝意を表したい。

参考文献

- 1) 宇宙開発戦略本部：宇宙基本計画，平成 25 年 1 月宇宙開発戦略本部決定，pp. 3, 2013.
- 2) 片山晴善，他 7 名：“将来の地球観測に向けた光学センサ技術の研究”，1S08，第 56 回宇宙科学技術連合講演会，2012.
- 3) 石村康生，他 14 名：“ASTRO-H 高精度大型構造物の熱変形試験”，2009，第 56 回宇宙科学技術連合講演会，2012.
- 4) Akira Takahashi：“Long-term dimensional stability of a line scale made of low thermal expansion ceramic NEXCERA”，Meas. Sci. Technol., 23, 2012