

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

3重構造化による極低温断熱性能を高めた 宇宙機用断熱トラス部材の研究

水谷 忠均, 北本 和也, 神谷 友裕, 篠崎 慶亮, 宇都宮 真

2016年2月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

3 重構造化による極低温断熱性能を高めた 宇宙機用断熱トラス部材の研究

水谷 忠均^{*1} 北本 和也^{*1} 神谷 友裕^{*1}
篠崎 慶亮^{*1} 宇都宮 真^{*1}

概要

本資料は宇宙航空研究開発機構 研究開発本部 構造・機構グループおよび熱グループが実施した研究「熱機能付加構造部材」の中で実施した、3重管化された宇宙機用断熱トラス部材の製作および試験結果をまとめたものである。なお、本資料中で記載する組織名は実施時の名称で表記している。

* 平成 27 年 12 月 15 日受付 (Received December 15, 2015)

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

目次

1 はじめに	3
2 製作および試験結果	6
2.1 供試体の設計および製作	6
2.2 極低温熱特性試験	12
2.3 機械特性試験	18
3 研究から得られた教訓	27
付録 A 材料物性値	28
A.1 取得した物性値のサマリ	28
A.2 繊維体積含有率	31
A.3 引張および圧縮特性	32
A.4 熱膨張係数	45
A.5 熱伝導率	50
A.6 半球方向輻射率	57
参考文献	58
謝辞	59

1 はじめに

本資料は JAXA が検討を進める次期赤外線天文衛星 SPICA のミッション部構造の概念検討から抽出した研究課題である。SPICA ミッション部構造の概念検討詳細は参考文献[1]を参照のこと。ここでは、図 1-1 に示す望遠鏡(SPICA telescope assembly, STA)の支持構造について簡単に説明して断熱トラス部材について研究を実施した背景を示す。

STA 支持構造の熱構造設計において技術的な挑戦となることが予測されたのは、衛星打ち上げ時の剛性を確保することと、運用中(軌道上)における熱の侵入と微小振動(擾乱)を低減することを両立させることであった。ここで言う STA 支持構造とは、図 1-1 に示す Upper Truss、Middle Truss、Lower Truss からなるトラス構造のことであり、Upper Truss の上端には 800kg を超える望遠鏡および観測機器類が搭載され軌道上では全体が 6K 以下に冷却される。また、Lower Truss の下端は衛星バス部に接続している。概念検討の結果、上記の要求を満たすためには Upper Truss と Middle Truss の節点においてトラス構造を軌道上で分離し、熱伝導度と剛性の低いバネで接続する方式(軌道上トラス分離機構)が有効であり、これにより衛星システム設計が成立する目処が得られた。

本研究では、さらなる性能要求が見込まれる将来衛星に向けた技術検討を行った。極低温環境における更なる熱侵入量低減を可能にする手段として、上記の例では最も低温部に配置される Upper Truss のパイプを折り返して 3 重管化し、熱伝達の経路を延ばすことによって断熱性能を高める方式を検討した[2][3]。以下、この部材のことを便宜的に 3 重管トラスと呼ぶ。

研究計画を立案する段階で先ず懸念されたのが 3 重管トラスの製造性である。宇宙機に搭載する上では限られたスペースおよび質量で 3 重管化をする必要があり、許容される制約条件の中で部材の製造が可能であるかどうか不明であった。また、断熱性能についても熱伝導に関するフーリエの法則から簡単な見積もりが得られていたが、ある程度の大きさを持った 3 重管トラスの熱伝導度をどのように試験で計測し、評価するか検討が必要であった。さらには、3 重管トラスはパイプが折り返される複雑な構造となるため、望遠鏡支持構造として使用するためには強度や剛性に対する評価も重要となる。これらを考慮した研究計画(進め方)を表 1-1 にまとめる。

第 2 章では本研究で行った製作および試験内容をまとめ、第 3 章では試験から得られた教訓をまとめる。なお、本研究の設計で使用した炭素繊維複合材料(Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP)の材料物性値は、大半が材料試験で得られた値を使用している。試験結果を付録 A に添付する。

本研究で設計した 3 重管トラスは SPICA の概念設計をベースラインとしており汎用的な内容でない。したがって、本資料では設計検証の詳細には触れず、設計に関わらず汎用的に参照できる 3 重管トラスの試験結果を中心に資料化を行った。本資料に含まれる内容は平成 24 年度(2012 年度)から平成 26 年度(2014 年度)の 3 年間で実施されたものである[4]・[6]。表 1-2 に研究の実施スケジュールを示す。今後、類似の開発や研究を実施する際の参考としていただければ幸いである。

表 1-1 本研究の計画

検討要素	検討内容	検討結果
3 重化トラス部材の製造性	設計者および製造者との意識合わせを繰り返し、製作(試作)を実施	2.1 節
断熱性能の評価手法確立	極低温熱伝導度計測のための試験系構築、評価技術の確立	2.2 節
複雑構造部材の耐荷重性	引張および圧縮試験を実施	2.3 節
3 重化による剛性低下	曲げ試験を実施	2.3 節
材料物性値の不足(特に極低温領域の熱物性)	材料試験の実施	付録 A

表 1-2 本研究のスケジュール

年度	項目
平成 24 年度	設計 製作(試作) 極低温熱特性試験 機械特性試験
平成 25 年度	極低温熱特性試験 機械特性試験
平成 26 年度	極低温熱特性試験

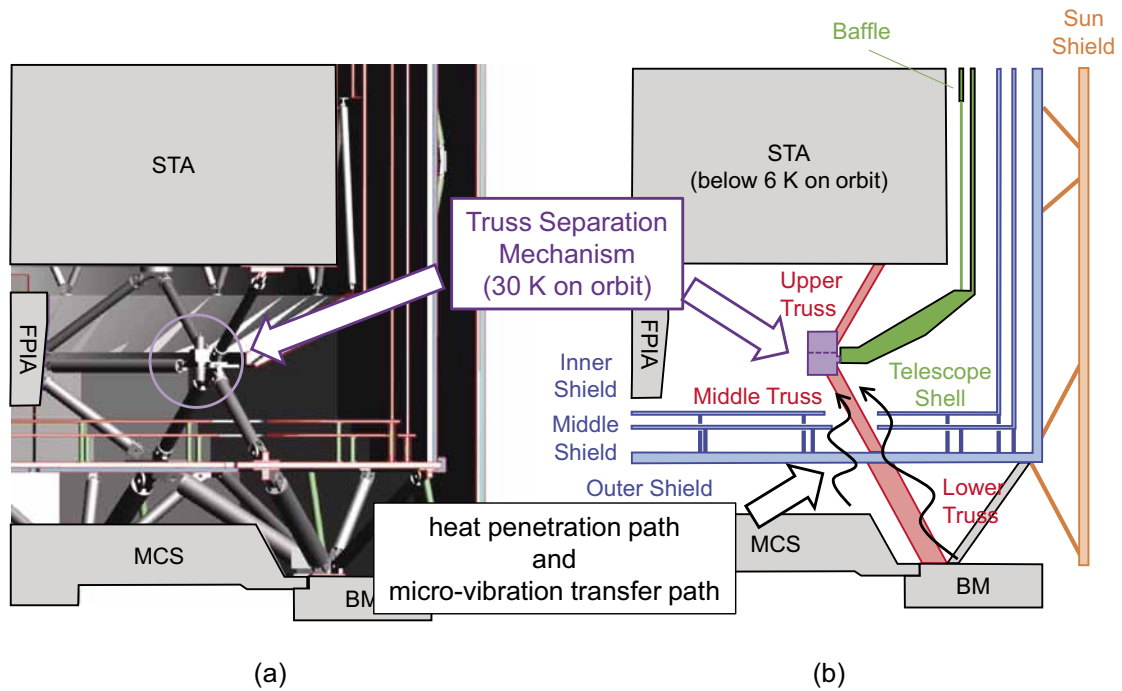


図 1-1 SPICA ミッション部構造の概略説明図(参考文献[1]の Fig. 4 より転載)。(a)は CAD の断面図であり、(b)は(a)に対応した各部材の説明。図中の略語は次の通り。BM: Bus Module、FPIA: Focal Plane Instrument Assembly、MCS: Mechanical Cooling System、STA: SPICA Telescope Assembly。

2 製作および試験結果

2.1 供試体の設計および製作

本研究では3重管トラスを2本、また比較検証用の断熱トラス部材(以下、単管トラスと呼ぶ)を1本製作した。供試体の概要を表 2-1 に示す。

単管トラスは第1章で述べた SPICA ミッション部構造の Upper Truss の設計を参考に、独自の設計を行った。単管トラスの高温端温度は 30K、低温端温度は 4K となることを想定している。また望遠鏡構造を支持する主構造となることも想定し、熱性能(断熱性能)と構造性能(強度および剛性)の双方を考慮した。設計した単管トラスの外観図を図 2-1、構成を表 2-2 にそれぞれ示す。単管トラスはパイプ1本とエンドフィッティング2個で構成されるシンプルな供試体である。パイプの材料は表 2-4 に示す CFRP を採用し、表 2-5 に示す積層設計を行った。エンドフィッティングの形状は試験系とのインターフェースを考慮した形状になっている。なお、パイプとエンドフィッティングの接合は、3重管トラスとの対比を考慮して接着接合とした。

3重管トラスは単管トラスの設計を基準に設計され、表 2-3 に示す3本の CFRP パイプ、2個のエンドフィッティングおよび振れ止め部から構成されている。供試体の外観図を図 2-2 に示す。3本のパイプのうち、最も内側に配置される内管の外径は単管トラスと同じ外径となるように設計した。内管の一端はエンドフィッティングと接合し、他端は端部を増厚して中管の内面と接合している。その中管は、内管との接合している端部と反対側の端部を増厚しており、その増厚部が外管の内面と接合している。そして、外管は中管と接合している端部の反対側でエンドフィッティングと接合している。これらの接合は、寸法や質量の制約を考慮し全て接着接合とした。また、単管と同様に、エンドフィッティングの形状は試験系とのインターフェースを考慮した形状になっている。

パイプを3重管化することにより曲げ剛性の低下が予測されるため、パイプの折り返し部(内管-中管および中管-外管)にはナイロン製の振れ止め部を設けている。この振れ止めとエンドフィッティングの間にはわずかな隙間があり、定常的な熱の伝達経路とならない。しかし、軸直交方向および曲げ方向の荷重が加わった場合には、振れ止めがエンドフィッティングに接触して荷重を受け持ち、変位を抑制する。

3重管トラスはパイプ外側表面が CFRP 素地のままのタイプ(3重管トラス A)と外層にアルミ蒸着フィルムをコキュアしてパイプ外側表面の輻射率を下げた供試体(3重管トラス B)の2種類を製作した。図 2-3 に3重管トラス B の写真を示す。なお、比較評価用の単管トラスのパイプ外側表面は CFRP 素地のままである。製作の結果、質量は単管トラスが 378.1 グラムに対して3重管トラスが 880 グラム前後と約 2.3 倍となった。本研究で使用した供試体の製造は住友重機械工業(株)が行った。

表 2-1 本研究で使用した供試体

No.	名称	外観図	写真	構成	アルミ蒸着 フィルム施工	質量
1	単管トラス	図 2-1	N/A	表 2-2	無	378.1 gram
2	3 重管トラス A	図 2-2	N/A	表 2-3	無	878.7 gram
3	3 重管トラス B	図 2-2	図 2-3	表 2-3	有	883.5 gram

表 2-2 単管トラスの構成

項目	寸法*1	材料
パイプ	外径 40mm、肉厚 2mm、長さ 425mm	CFRP*2
エンドフィッティング	A パイプ(上端)と試験系を接続する寸法で製作 B パイプ(下端)と試験系を接続する寸法で製作	A6061 A6061
最大外径(包絡域)	直径 86 mm、長さ 455 mm	

- *1 パイプ寸法は平行部の値を記載している。
- *2 パイプに使用した CFRP 材料は表 2-4、積層構成は表 2-5 をそれぞれ参照のこと。
- *3 パイプとエンドフィッティングの接合は接着による。使用した接着剤は STYCAST 2850FT / Catalyst 9 である。

表 2-3 3 重管トラスの構成

項目	寸法*1	材料
パイプ	外管 外径 56mm、肉厚 2mm、長さ 427mm 中管 外径 48mm、肉厚 2mm、長さ 421mm 内管 外径 40mm、肉厚 2mm、長さ 419mm	CFRP*2 CFRP*2 CFRP*2
エンドフィッティング	A 内管と試験系を接続する寸法で製作 B 外管と試験系を接続する寸法で製作	A6061 A6061
振れ止め部		ナイロン
最大外径(包絡域)	直径 86 mm、長さ 455 mm	

- *1 パイプ寸法は平行部の値を記載している。
- *2 パイプに使用した CFRP 材料は表 2-4、積層構成は表 2-5 をそれぞれ参照のこと。
- *3 パイプとエンドフィッティングおよびパイプ同士の接合は接着による。使用した接着剤は STYCAST 2850FT / Catalyst 9 である。

表 2-4 パイプに使用した CFRP 材料

型番	メーカー	炭素繊維	樹脂	厚み(参考値) mm
P3051S-5	東レ(株)	T700SC	#2500	0.06
P3252S-10	東レ(株)	T700SC	#2592	0.10

表 2-5 パイプの積層構成

層数	配向*1 deg	プリプレグ
1 層目	0	P3252S-10
2 層目	90	P3051S-5
3 層目	2	P3252S-10
4 層目	-2	P3252S-10
5 層目	0	P3252S-10
6 層目	2	P3252S-10
7 層目	-2	P3252S-10
8 層目	0	P3252S-10
9 層目	2	P3252S-10
10 層目	-2	P3252S-10
11 層目	0	P3252S-10
12 層目	-2	P3252S-10
13 層目	2	P3252S-10
14 層目	0	P3252S-10
15 層目	-2	P3252S-10
16 層目	2	P3252S-10
17 層目	0	P3252S-10
18 層目	-2	P3252S-10
19 層目	2	P3252S-10
20 層目	90	P3051S-5
21 層目	0	P3252S-10

*1 パイプ軸方向を配向角 0°方向、周方向を 90°方向として定義

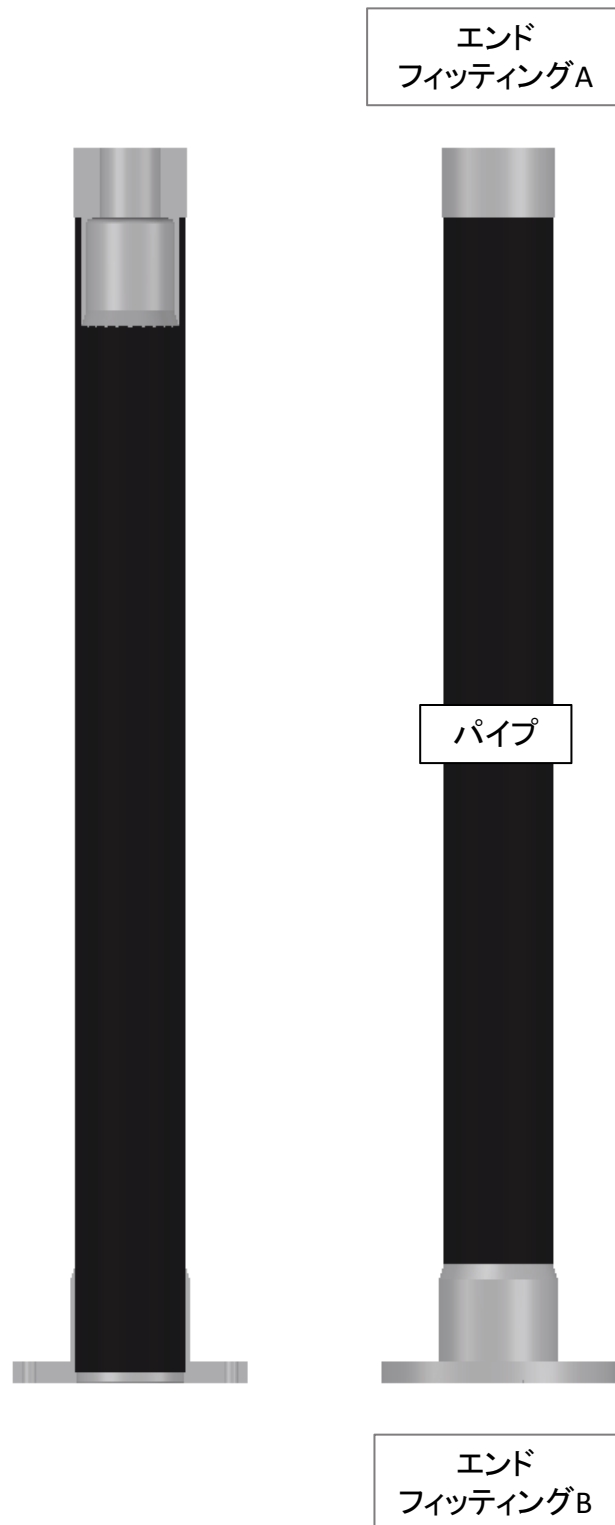


図 2-1 単管トラスの外観図および断面図

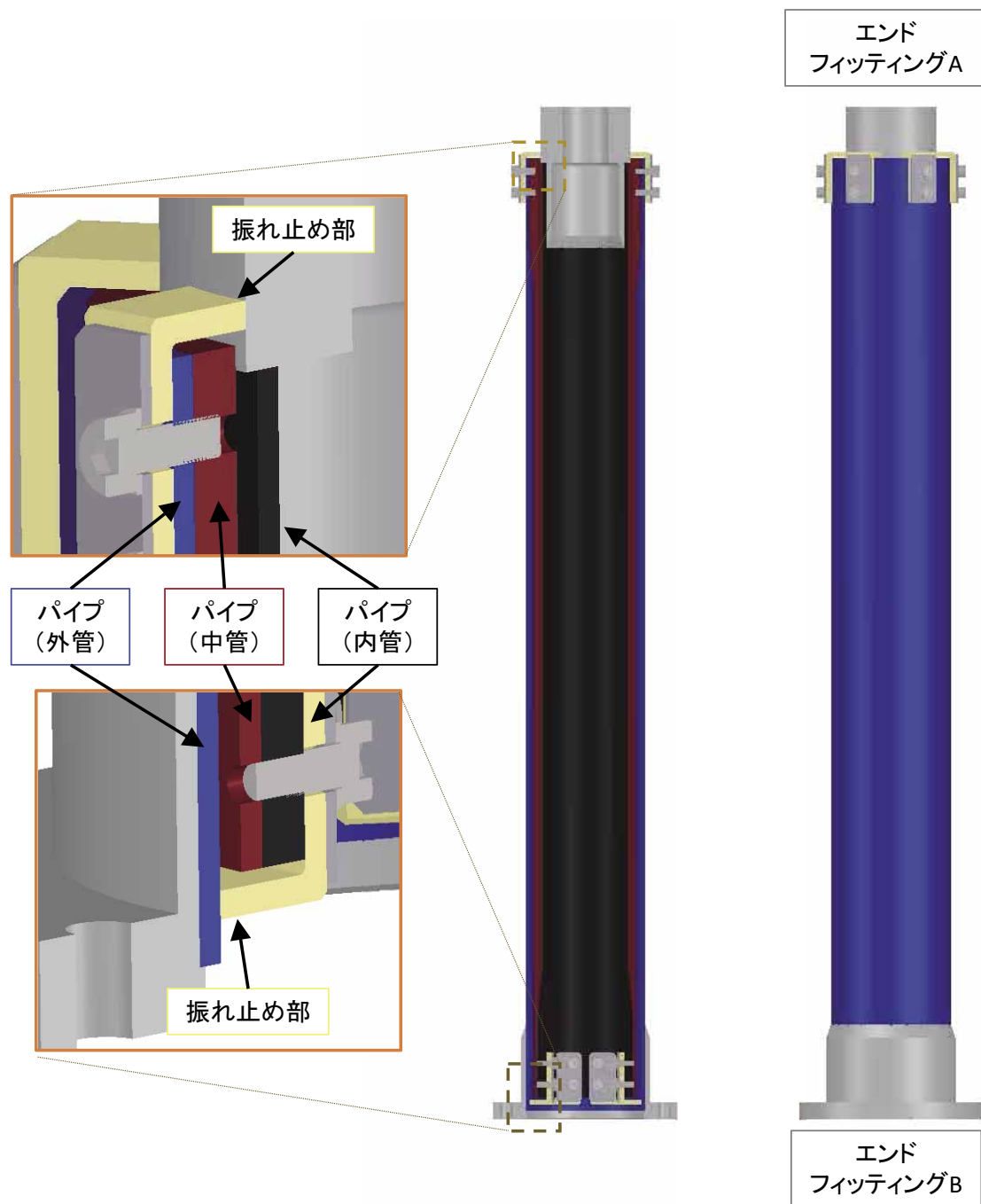


図 2-2 3重管トラスの概観図および断面図



図 2-3 3重管トラス B(アルミ蒸着施工有)の写真

2.2 極低温熱特性試験

3 重管トラス接続点間(エンドフィッティング間)の熱伝導特性を評価する試験を行った。外径寸法で直径 86mm、長さ 455mm の部材、さらに 4K から 30K 以下という極低温環境下における熱伝導度を計測することは非常に困難であり、本研究では熱試験系の構築が大きな技術課題であった。また、3 重管トラスの熱伝導特性を評価するためには供試体内部を流れる熱量を正確に見積もる必要があり、そのためには確度の高い試験解析技術(数値解析技術)が必要となる。本資料では試験方法と試験結果のみを記載し、供試体の熱伝導特性評価は定性的な説明にとどめる。

極低温熱特性試験は表 2-6 に示す手順で実施した。供試体にセンサ類を取り付けた後、2 重のシールドで覆い真空容器内に設置する。真空ポンプを用いて容器内部を 1.0×10^{-2} Pa 程度まで排気した後、機械式冷凍機(Gifford-McMahon cooler、GM 冷凍機)で供試体を冷却する。供試体が十分に冷却されたことを確認した後に、温調用のヒータを用いて供試体の低温端を取り付ける 2 段ステージと供試体と直接対面する 2 段シールドの温度を所定の温度で維持する。ここで、供試体の高温端に取り付けた熱負荷用のヒータを用いて所定の熱負荷を供試体に加える。各温度センサの計測値をモニタし、十分な温度安定を確認した後に温度センサの値を記録する。

本研究では、まずは 4K から 30K 領域における供試体の熱特性を評価した。試験コンフィギュレーションを図 2-4、試験条件を表 2-7、試験結果を表 2-8 にそれぞれ示す。定性的には高温端温度が高いほど断熱性能が良いことを示しており、単管トラスよりも 3 重管トラスのほうが断熱性能に優れることがわかる。また、表 2-8 の試験ケース 6 から 8 までの結果を比較した場合、高温端の温度が 30K 程度のケースではパイプ外表面にアルミ蒸着フィルムを施工した 3 重管トラス B が CFRP 素地の 3 重管トラス A よりも断熱性能に優れる。

次に、より広い温度範囲における熱特性を把握するために高温端温度の範囲を 100K 程度まで広げた試験を行った。試験コンフィギュレーションを図 2-5、試験条件を表 2-9、試験結果を表 2-10 にそれぞれ示す。単管トラスを用いた予備試験の結果と比較して、表 2-10 の試験ケース 5 から 3 重管トラスの優位性が 100K 近くの領域まで示される結果となった。

表 2-6 極低温熱特性試験の試験手順

No.	内容
1	試験系を組み立てる。
2	真空ポンプを用いて真空容器内部を $1.0 \times 10^{-2} \text{Pa}$ 程度まで排気する。
3	GM 冷凍機を動作させ、供試体を冷却する。
4	供試体が十分冷却されたことを確認した後に、2 段階ステージ温調用ヒータを用いて低温端および 2 段階シールド温度を所定の温度で維持する。
5	熱負荷用ヒータを用いて所定の熱負荷を供試体に加える。
6	各温度センサの計測値が定常状態であることを確認し、温度を記録する。

表 2-7 極低温熱特性試験(その 1)の試験条件

No.	供試体	振れ止め	低温端温度 K	熱負荷量 mW
1	単管トラス	N/A	4K 以下	0.1
2	3 重管トラス A	N/A	4K 以下	0.1
3	3 重管トラス B	無 ^{*1}	4K 以下	0.1
4	3 重管トラス B	有	4K 以下	0.1
5	単管トラス	N/A	4K 以下	1.0
6	3 重管トラス A	N/A	4K 以下	1.0
7	3 重管トラス B	無 ^{*1}	4K 以下	1.0
8	3 重管トラス B	有	4K 以下	1.0

*1 施工されている振れ止めを外して試験を実施した。

表 2-8 極低温熱特性試験(その 1)の試験結果

No.	低温端 K	外管低温端 K	高温端 K	2 段シールド温度 K
1	3.544	N/A	7.876	3.679
2	3.566	10.052	11.882	3.626
3	3.382	10.131	12.036	3.438
4	3.383	9.910	11.816	3.491
5	3.488	N/A	24.567	3.605
6	3.605	26.226	30.728	3.656
7	3.418	29.123	33.729	3.470
8	3.519	28.868	33.610	3.603

表 2-9 極低温熱特性試験(その 2)の試験条件

No.	供試体	振れ止め	低温端温度 K	熱負荷量 mW
1	3 重管トラス B	無 ^{*1}	30K 付近	0.0
2	3 重管トラス B	無 ^{*1}	30K 付近	4.0
3	3 重管トラス B	無 ^{*1}	30K 付近	8.0
4	3 重管トラス B	無 ^{*1}	30K 付近	22.0 ^{*2}
5	3 重管トラス B	無 ^{*1}	4K 付近	17.564 ^{*3}

*1 施工されている振れ止めを外して試験を実施した。

*2 高温端が 100K を超える負荷として計画した。

*3 予備試験における単管トラスの試験結果より同等の高温端温度となるように計画した。
(熱負荷量 32mW、低温端温度 3.935K、高温端温度 92.667K、シールド温度 3.771K)

表 2-10 極低温熱特性試験(その 2)の試験結果

No.	低温端 K	外管高温端 K	内管高温端 K	高温端 K	2 段シールド温度 K
1	30.010	30.395	30.498	30.633	30.668
2	30.085	43.576	51.698	61.301	30.737
3	29.855	51.652	62.201	74.822	31.118
4	29.766	68.023	82.370	101.399	30.992
5	3.281	61.120	75.499	93.272	3.197

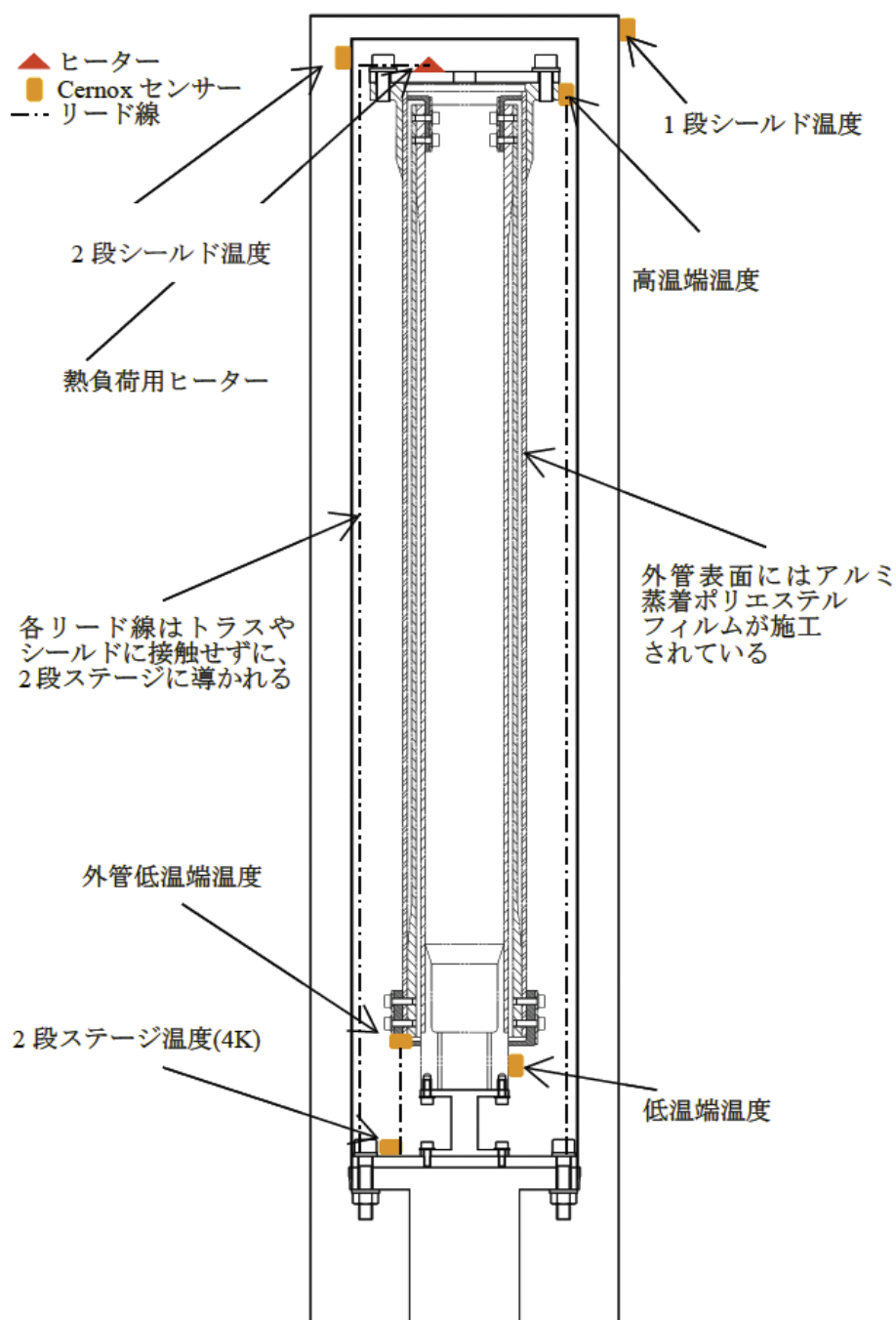


図 2-4 3 重管トラス部材の極低温熱特性試験コンフィギュレーション(その 1)

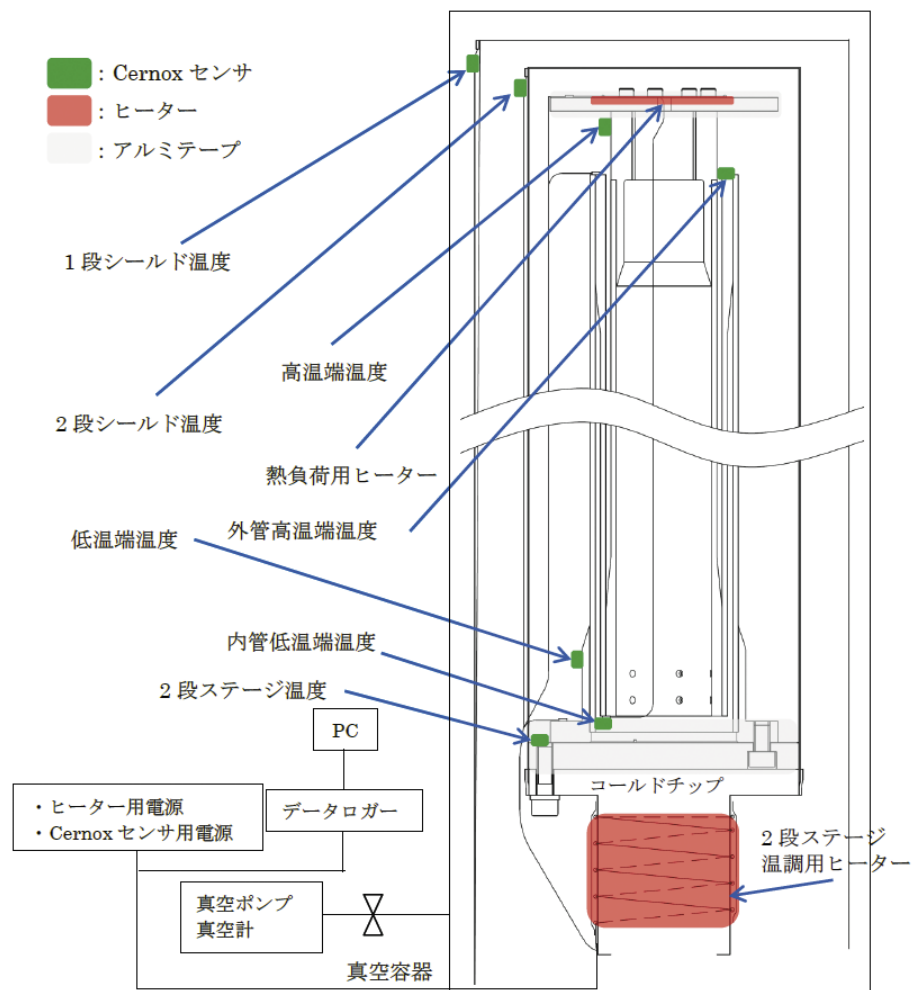


図 2-5 3 重管トラス部材の極低温熱特性試験コンフィギュレーション(その 2)

2.3 機械特性試験

3 重管トラスの強度および剛性を確認するための試験を行った。本研究では引張試験、圧縮試験および曲げ試験を実施した。実施した試験の概要を表 2-11 に示す。

引張試験は単管トラスおよび 3 重管トラス A を用いて行った。試験コンフィギュレーションを図 2-6 に示す。荷重負荷の速度は 0.2mm/min 以下とし、供試体の外観、荷重およびひずみの計測値を確認しながらトラスの軸方向に引張荷重を加えた。試験結果を表 2-12 に示す。単管トラス、3 重管トラス A とともに内管とエンドフィッティング A の接着部が破損した。試験後の単管トラスの写真を図 2-9 に、3 重管トラス A の写真を図 2-10 にそれぞれ示す。なお、供試体製作から引張試験までに、ヒートサイクル(300K→4K→300K)による熱負荷を単管トラスは 3 回、3 重管トラス A は 6 回それぞれ与えている。

今回の供試体設計においてエンドフィッティング A は引張荷重を接着部で内管パイプに伝達するが、圧縮荷重の場合はフィッティング A が内管パイプの端面と突き当たることで荷重を伝える。そのことから、3 重管パイプ A については引張試験後に圧縮試験も実施した。圧縮試験の試験コンフィギュレーションを図 2-7 に示す。引張試験と同等の荷重速度で供試体が破損するまで試験を実施した。試験結果を表 2-12 に示す。圧縮試験では内管と中管の接着部が破損した。試験後の写真を図 2-11 に示す。引張試験の結果と比較して、破壊荷重は相当高い値となっているが、これは前述のようにパイプとエンドフィッティングが接合する部分の形状が大きく影響していると考えられる。

曲げ試験はパイプの 3 重構造化に伴う曲げ剛性低下の影響を確認するために実施した。試験コンフィギュレーションは図 2-8 に示すとおり片持ち梁の境界条件である。使用した供試体は 3 重管トラス B であり、片持ち梁の自由端に約 150N の集中荷重を加えてそのときの変位を計測した。試験結果を表 2-13 に示す。単管トラスの解析値と比較して、振れ止めを外した状態での 3 重管トラスは変位が大きくなる。一方で、振れ止めを取り付けた状態では変位が小さくなる結果が得られ、振れ止め部の有効性を確認することができた。

最後に、引張試験および圧縮試験では接着界面の剥離による破壊が見られたことから、接着強度を確認するための要素試験を行った。ここでは JIS K 6848-1 および JIS K 6850 に準拠した試験を実施した。試験の概要を表 2-14 に示す。試験片は CFRP と AL 合金もしくは CFRP 同士を接着して製作したものであり、熱負荷は加えていないものである。試験結果を表 2-15 に示す。接着面の表面処理を変更すると接着強度が大きく変化しており、3 重管トラスの強度に大きな影響を与えることが予測される。また、接着接合以外の接合方法による 3 重管トラスの製造可能性についても検討を実施している[7]。

表 2-11 機械特性試験の概要

試験	引張試験	圧縮試験	曲げ試験
コンフィギュレーション	図 2-6	図 2-7	図 2-8
単管トラス	○(破損)		
3 重管トラス A	○(破損)	○*1(破損)	
3 重管トラス B			○

- *1 3 重管トラス A は引張試験で接着部が破損したが、破損箇所は圧縮試験の実施に影響を及ぼさないため、引張試験後に圧縮試験を実施した。

表 2-12 引張試験および圧縮試験の結果

供試体	試験	破壊荷重 kN	破壊箇所	写真
単管トラス	引張試験	7.2	内管とフィッティング A の接着部	図 2-9
3 重管トラス A	引張試験	2.1	内管とフィッティング A の接着部	図 2-10
3 重管トラス A	圧縮試験	61	内管と中管の接着部	図 2-11

表 2-13 曲げ試験の結果

供試体	振れ止め部	荷重 N	変位 mm	備考
3 重管トラス B	なし	152	2.1	
3 重管トラス B	あり	152	0.75	荷重方向は図 2-8 の X 方向
3 重管トラス B	あり	152	0.72	荷重方向は図 2-8 の Y 方向
単管トラス	N/A	150	1.5	解析値(参考)

表 2-14 接着強度比較試験に使用する試験片と接着方法

No.	被接着体	接着面の表面処理	接着面の面粗し方法
1	CFRP ^{*1} /Al 合金 ^{*2}	サンドペーパー	#300、#400、#500、#600 を粗い順に使用 ^{*3}
2	CFRP/Al 合金	サンドペーパー	#180
3	CFRP/CFRP	サンドペーパー	#180
4	CFRP/Al 合金	CFRP/サンドペーパー Al 合金/ショットブラスト	サンドペーパー: #180 ショットブラスト: 下記 ^{*4}
5	CFRP/Al 合金	ショットブラスト	下記 ^{*4}

^{*1} 供試体とは異なる CFRP 平板から製作した。プリプレグは HYEJ34M65PD、E8025C、E9025C を使用している。
^{*2} A6061-T651 (化成処理皮膜あり)
^{*3} 供試体製作時と同じ方法
^{*4} アルミナ粒径: #46、圧力: 7 kgf/cm²
^{*5} 使用した接着剤は STYCAST 2850FT / Catalyst 9

表 2-15 接着強度比較結果

No.	試験数	接着強度(平均値)	標準偏差
		MPa	MPa
1	4	5.1	0.6
2	5	5.9	0.7
3	5	12.8 以上 ^{*1}	N/A
4	2	14.1	N/A ^{*2}
5	3	14.2	0.8

- ^{*1} 試験片のつかみ部にすべりがあり試験終了。試験終了時点で接着部は破壊せず。
^{*2} 試験数 2 のため記載しない。

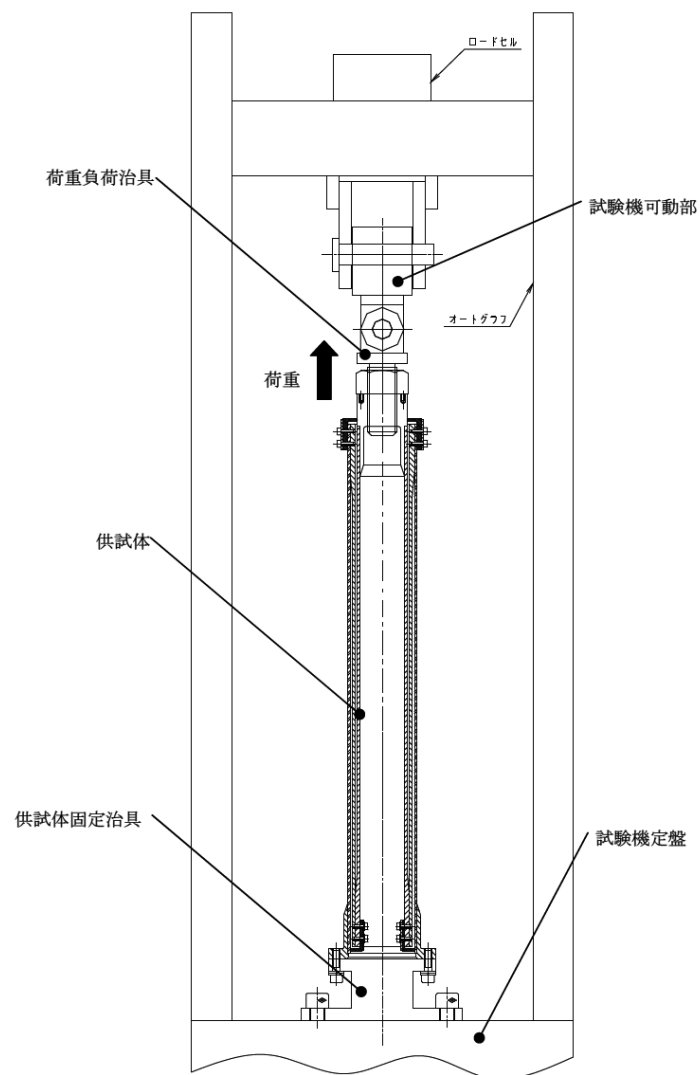


図 2-6 引張試験の試験コンフィギュレーション

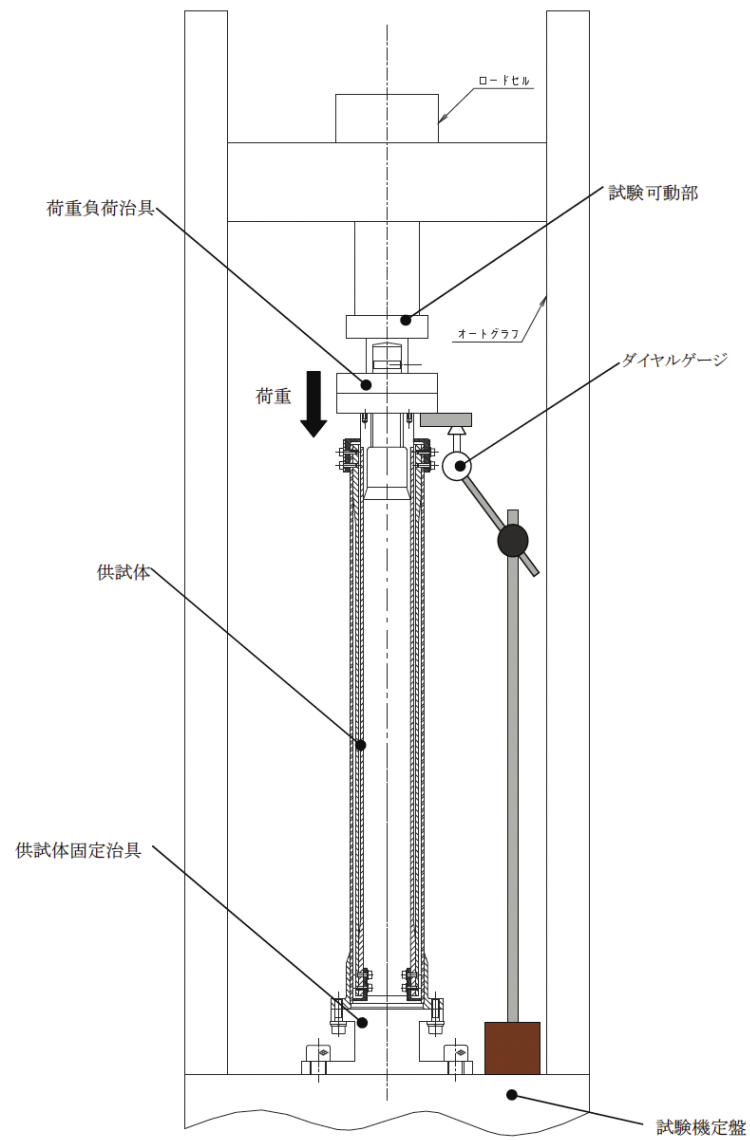


図 2-7 圧縮試験の試験コンフィギュレーション

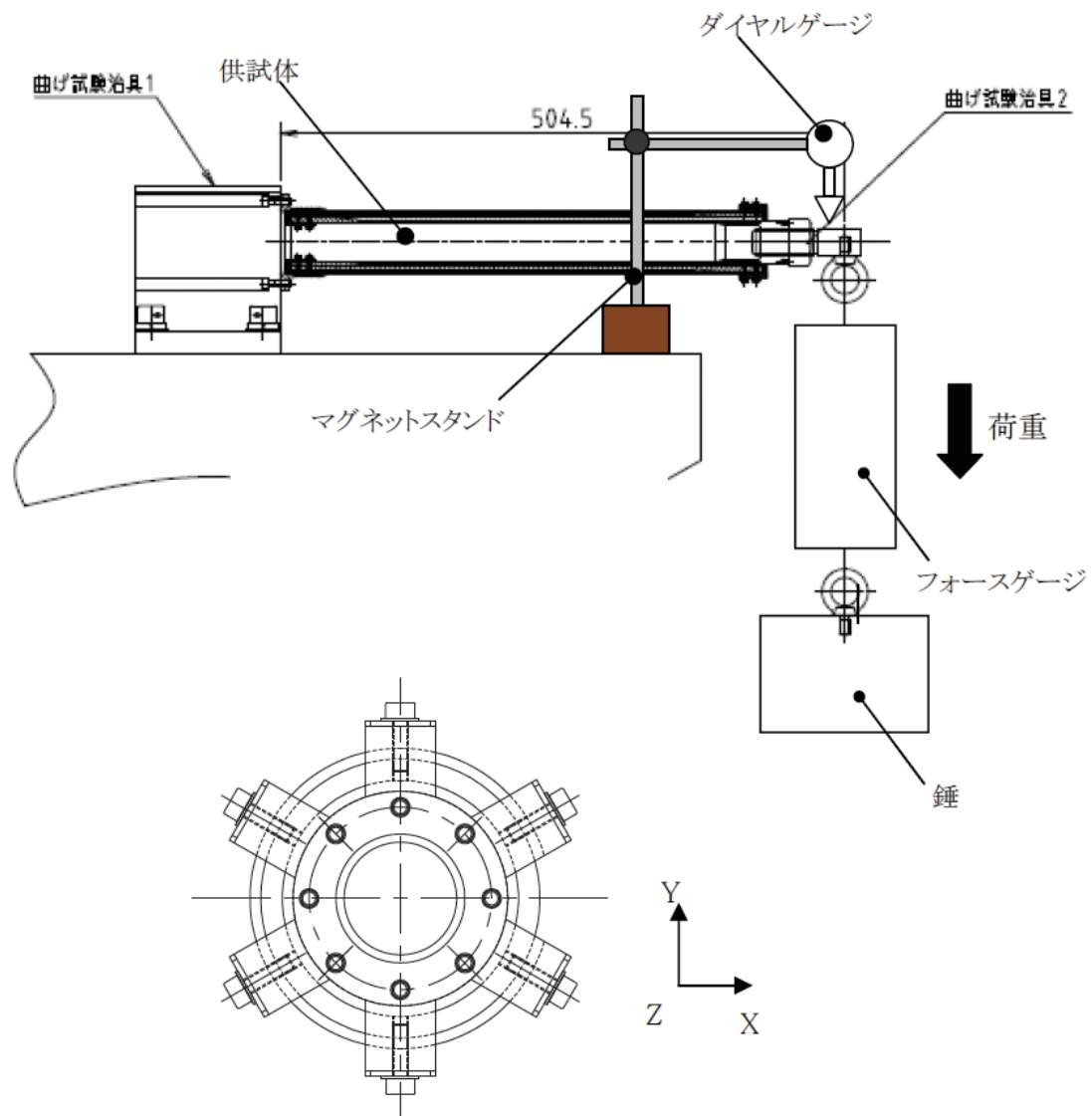


図 2-8 曲げ試験の試験コンフィギュレーション

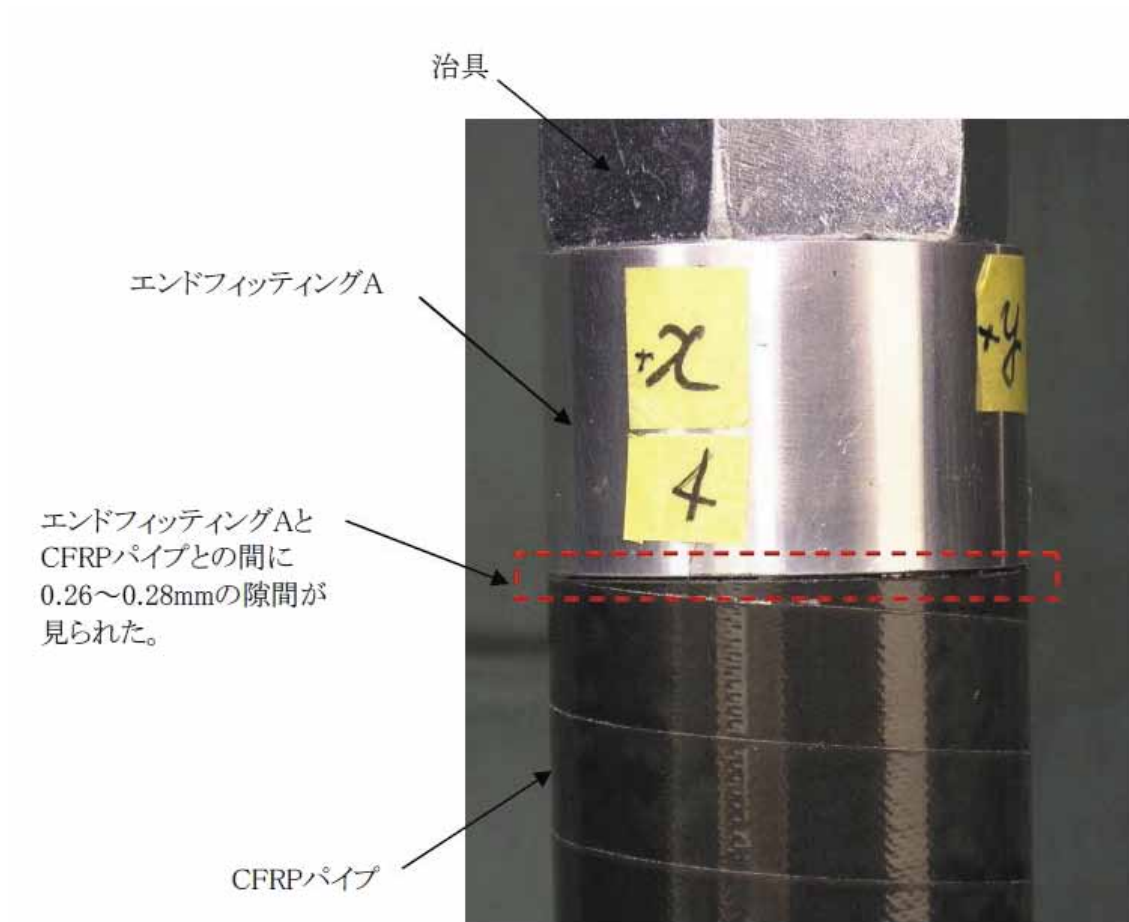


図 2-9 引張試験後の単管トラス部材破損箇所



図 2-10 引張試験後の3重管トラスA 破損箇所

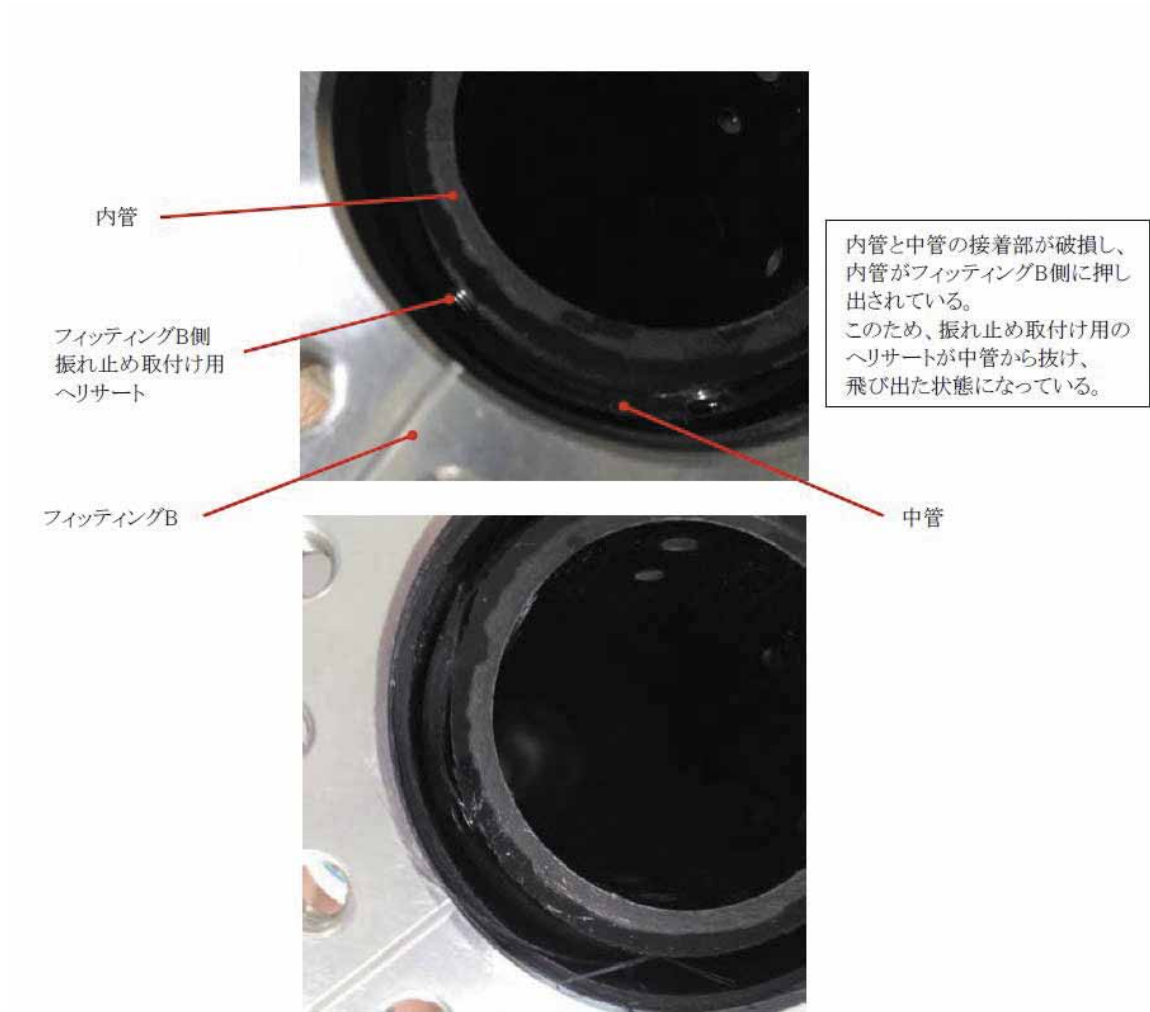


図 2-11 圧縮試験後の3重管トラスA 破損箇所

3 研究から得られた教訓

本研究の実施からは数多くの教訓が得られた。いずれも一般的な話題ではあるが、ここでは以下の3点を特に強調したい。

- 接着構造の設計に関する教訓(要素試験や管理・検査手法の重要性)

本研究の構造設計においては、接着部の設計が最も重要な要素であった。特に、金属と複合材料では熱膨張係数が異なるため、大きな熱サイクルが加わることが想定される場合には、事前に十分な検討が必要である。また、接着強度に関する要素試験は通常シングルラップ等の平板同士を接着した試験片を使用するが、本研究のようにパイプ同士を接着する場合には極力、実体に近い形で要素試験を行うべきである。

このように主構造部材において接着接合を採用することは非常に技術的な難易度が高く、接着部の品質管理や健全性評価手法が重要な技術要素となる。本研究においては、超音波探傷およびX線CTによる非破壊検査を活用したが、接着層は非常に薄く健全性評価は容易ではなかった。より簡便で確実な接着部の評価手法が望まれる。

- 複合材を用いた設計に関する教訓(材料試験による実測値に基づいた設計を行う重要性)

複合材料の物性値については材料、積層構成、製造方法等の組み合わせを考慮すると組み合わせは非常に多岐にわたる。従って、一般的な文献に記載されている物性値とは必ずしも条件が一致しないため、設計に用いる物性値については慎重な評価が必要である。特に、極低温領域における物性値は公開されているデータ数が少なく、かつ相当過去に取得されたデータが多数見受けられるため、可能な限り実測した値を設計に反映することを推奨する。

- 極低温熱試験系の構築に関する教訓

本研究では極低温環境における3重管トラスの熱性能評価が最大の技術課題であった。極低温環境における実験という特殊性もあるが、以下の点で試行錯誤を行って試験系を構築した。

- 大きな部材を冷却する必要があるため、冷却および温度安定までの時間が必要であった。本研究ではHeガス導入による冷却時間短縮を試みた。
- 小さな熱量を扱う試験のため、供試体以外の熱経路を極力減らすことが重要である。例えば、リード線には銅線ではなくマンガニン線を使用する、等の工夫を行った。
- 供試体内部の熱流量推定には確度の高い数値解析モデルが必要となるため、計算誤差を減らすための試験コンフィギュレーションを構築する必要がある。例えば、ボルト頭をアルミテープで覆う、等の工夫を行った。
- 輻射は絶対温度の4乗で効くため、解析モデルの妥当性には注意が必要である。
- アルミテープは輻射断熱の材料として優秀である[8]。輻射率不明な材料の表面にはアルミテープを貼って対処することも可能。ただし、熱伝導が良いことも考慮する必要がある。

付録A 材料物性値

A.1 取得した物性値のサマリ

本研究で参照した炭素繊維強化複合材料(CFRP)の材料物性値のうち、試験で取得したものを記載する。表 A-1 は取得データの平均値である。測定に使用した試験片はシキボウ(株)が製作した。材料および積層構成を表 A-2 および表 A-3 にそれぞれ示す。なお、繊維体積含有率は A.2 節に、引張および圧縮特性は A.3 節に、熱膨張係数は A.4 節に、熱伝導率は A.5 節に、半球方向輻射率は A.6 節にそれぞれの詳細を記載する。

表 A-1 材料物性の計測値(サマリ)

物性値	単位	準拠規格	計測温度	積層	方向	平均値
質量密度	g/cm ³	N/A	室温	表 A-3	N/A	1.57
繊維体積含有率	%	JIS K7075	室温	表 A-3	N/A	58.9
引張強度	MPa	ASTM D3039	室温	表 A-3	0° 90°	2390 162
引張弾性率	GPa	同上	同上	表 A-3	0° 90°	119 14.8
圧縮強度	MPa	ASTM D6641	室温	表 A-3	0° 90°	882 179
圧縮弾性率	GPa	同上	同上	表 A-3	0° 90°	106 13.7
平均熱膨張係数	10 ⁻⁶ /°C	N/A	-150°C (20°C 基準)	表 A-3	0° 90°	0.649 11.085
熱伝導率*1	W/m/K	N/A	30K	表 A-4	0° 90°	0.156 0.084
半球方向輻射率*2		N/A	室温	N/A	N/A	0.027

*1 30K 直近計測値の平均

*2 試験片の成型がオートクレーブ(コキュア)によるものの平均値

表 A-2 使用材料(プリプレグ)

型番	メーカー	炭素繊維	樹脂	厚み(参考値) mm
P3051S-5	東レ(株)	T700SC	#2500	0.06
P3252S-10	東レ(株)	T700SC	#2592	0.10
P3252S-15	東レ(株)	T700SC	#2592	0.14

表 A-3 試験片の積層構成(その 1)

層数	配向 deg	プリプレグ
1 層目	0	P3252S-10
2 層目	90	P3051S-5
3 層目	2	P3252S-10
4 層目	-2	P3252S-10
5 層目	0	P3252S-10
6 層目	2	P3252S-10
7 層目	-2	P3252S-10
8 層目	0	P3252S-10
9 層目	2	P3252S-10
10 層目	-2	P3252S-10
11 層目	0	P3252S-10
12 層目	-2	P3252S-10
13 層目	2	P3252S-10
14 層目	0	P3252S-10
15 層目	-2	P3252S-10
16 層目	2	P3252S-10
17 層目	0	P3252S-10
18 層目	-2	P3252S-10
19 層目	2	P3252S-10
20 層目	90	P3051S-5
21 層目	0	P3252S-10

表 A-4 試験片の積層構成(その 2)

層数	配向	プリプレグ
	deg	
1 層目	0	P3252S-15
2 層目	0	P3252S-15
3 層目	0	P3252S-15
4 層目	0	P3252S-15
5 層目	0	P3252S-15
6 層目	0	P3252S-15

A.2 繊維体積含有率

繊維体積含有率は表 A-3 に示す積層構成の CFRP 積層板からサンプルを 5 ヶ所切り出して測定した。測定結果を表 A-5 に示す。ここでは JIS K7075 に準拠した計測を行ったが、炭素繊維の密度はカタログ値 (1.80g/cm^3) を使用した。また、測定時の温度は 23.5°C 、湿度は 23%RH であった。計測はシキボウ(株)で実施した。

表 A-5 繊維体積含有率の計測結果

No.	繊維体積含有率
	%
1	59.4
2	58.9
3	59.5
4	59.7
5	57.1
平均値	58.9
標準偏差	1.1
変動係数 [%]	1.8

A.3 引張および圧縮特性

引張試験および圧縮試験は表 A-3 に示す積層構成の CFRP 積層板から試験片を切り出して実施した。試験は配向角 0° 方向および 90° 方向についてそれぞれ実施した。引張試験は ASTM D3039 に、圧縮試験は ASTM D6641 にそれぞれ準拠している。試験結果を表 A-6 から表 A-13 に、各試験における応力-ひずみ線図および試験後の試験片の写真を図 A-1 から図 A-8 にそれぞれ示す。計測は JAXA 研究開発本部複合材技術研究センターで実施した。

表 A-6 引張試験(配向角 0°方向)を行った試験片の詳細および試験環境。L は引張方向、W はその直交方向、T は積層(板厚)方向の寸法をそれぞれ示す。

S/N	積層構成	引張方向	寸法			温度	湿度
			deg	mm			
		L	W	T			
1	表 A-3	0	249.97	14.94	1.941	26.8	8.0
2	表 A-3	0	249.82	14.96	1.941	26.3	8.0
3	表 A-3	0	249.75	14.94	1.934	25.9	9.0
4	表 A-3	0	249.75	14.95	1.933	25.8	11.0
5	表 A-3	0	249.79	14.97	1.941	25.8	11.0

表 A-7 配向角 0°方向の引張試験結果

S/N	引張強度	引張弾性率	破断ひずみ	ポアソン比
	MPa	GPa	%	
1	2365.24	119.36	1.79	0.20
2	2390.92	120.66	1.80	0.20
3	2408.72	118.79	1.83	0.20
4	2429.21	119.49	1.82	0.20
5	2335.83	118.35	1.77	0.19
平均値	2385.98	119.33	1.80	0.19
標準偏差	36.59	0.87	0.02	0.00
変動係数 [%]	1.53	0.73	1.26	1.83

(注 1) ひずみは試験片表面の表裏の計測値を平均した値

(注 2) 引張弾性率およびポアソン比はひずみが 0.1%と 0.3%の間の値から算出

(注 3) 引張強度は試験終了までの最大荷重から算出

表 A-8 引張試験(配向角 90°方向)を行った試験片の詳細および試験環境。L は引張方向、W はその直交方向、T は積層(板厚)方向の寸法をそれぞれ示す。

S/N	積層構成	引張方向	寸法			温度	湿度
			deg	mm			
		L	W	T			
1	表 A-3	90	250.32	14.92	1.967	25.7	12.0
2	表 A-3	90	250.30	14.87	1.969	25.6	14.0
3	表 A-3	90	250.29	14.89	1.971	25.6	14.0
4	表 A-3	90	250.30	14.92	1.969	25.6	16.0
5	表 A-3	90	250.26	14.92	1.967	25.5	15.2

表 A-9 配向角 90°方向の引張試験結果

S/N	引張強度	引張弾性率	破断ひずみ	ポアソン比
	MPa	GPa	%	
1	174.12	14.53	—	0.03
2	157.85	14.42	1.18	0.03
3	157.52	14.49	1.16	0.02
4	163.08	15.59	1.15	0.02
5	155.90	14.80	1.13	0.02
平均値	161.69	14.76	1.16	0.03
標準偏差	7.45	0.48	0.02	0.00
変動係数 [%]	4.61	3.27	1.84	10.98

(注 1) ひずみは試験片表面の表裏の計測値を平均した値

(注 2) 引張弾性率およびポアソン比はひずみが 0.1%と 0.3%の間の値から算出

表 A-10 圧縮試験(配向角 0°方向)を行った試験片の詳細および試験環境。L は圧縮方向、W はその直交方向、T は積層(板厚)方向の寸法をそれぞれ示す。

S/N	積層構成	圧縮方向 deg	寸法 mm			温度 ℃	湿度 %RH
			L	W	T		
1	表 A-3	0	140.02	11.96	1.948	23.1	50.4
2	表 A-3	0	140.01	11.96	1.950	21.9	56.4
3	表 A-3	0	140.00	12.02	1.955	22.4	53.3
4	表 A-3	0	139.98	11.98	1.947	22.4	53.2
5	表 A-3	0	139.97	11.99	1.947	22.5	52.1

表 A-11 配向角 0°方向の圧縮試験結果

S/N	圧縮強度	弾性率	破断ひずみ	破断ひずみ
	MPa	GPa	表面, %	裏面, %
1	899.46	106.21	0.85	0.95
2	813.18	105.58	0.79	0.82
3	876.32	106.12	0.82	0.93
4	911.31	106.64	0.91	0.91
5	907.80	105.22	0.88	0.97
平均値	881.62	105.95	0.85	0.92
標準偏差	40.61	0.56	0.04	0.06
変動係数 [%]	4.61	0.53	5.29	6.25

(注 1) 弾性率はひずみが 0.1%と 0.3%の間の値から算出

(注 2) 破断ひずみは試験終了までの最大荷重時の値

表 A-12 圧縮試験(配向角 90°方向)を行った試験片の詳細および試験環境。L は圧縮方向、W はその直交方向、T は積層(板厚)方向の寸法をそれぞれ示す。

S/N	積層構成	圧縮方向 deg	寸法			温度 ℃	湿度 %RH
			mm				
			L	W	T		
1	表 A-3	90	140.03	12.04	1.987	22.8	49.4
2	表 A-3	90	140.02	12.02	1.984	22.9	49.5
3	表 A-3	90	140.02	12.00	1.991	22.9	50.0
4	表 A-3	90	140.00	11.97	1.985	22.9	50.6
5	表 A-3	90	139.98	12.03	1.991	22.9	51.2

表 A-13 配向角 90°方向の圧縮試験結果

S/N	圧縮強度	弾性率	破断ひずみ	破断ひずみ
	MPa	GPa	表面, %	裏面, %
1	177.27	13.54	0.77	2.26
2	177.72	13.83	0.81	2.18
3	177.34	13.61	0.67	2.44
4	181.00	13.85	1.28	1.63
5	182.95	13.72	1.44	1.52
平均値	179.26	13.71	0.99	2.01
標準偏差	2.58	0.14	0.34	0.41
変動係数 [%]	1.44	0.99	34.49	20.29

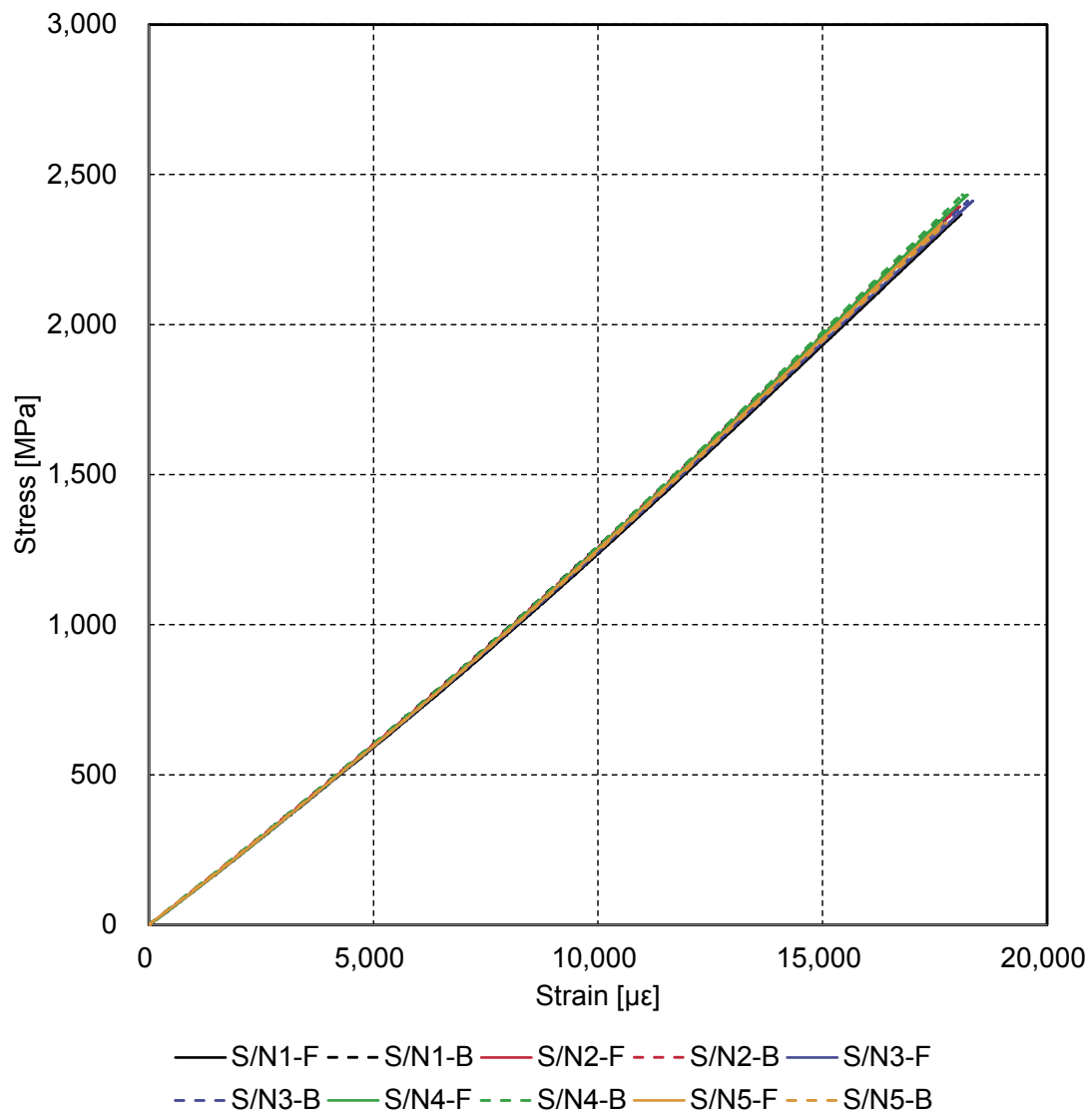


図 A-1 配向角 0°方向、引張試験時の応力-ひずみ線図。凡例の-Fは供試体表面、-Bは裏面の引張方向ひずみをそれぞれ示す。

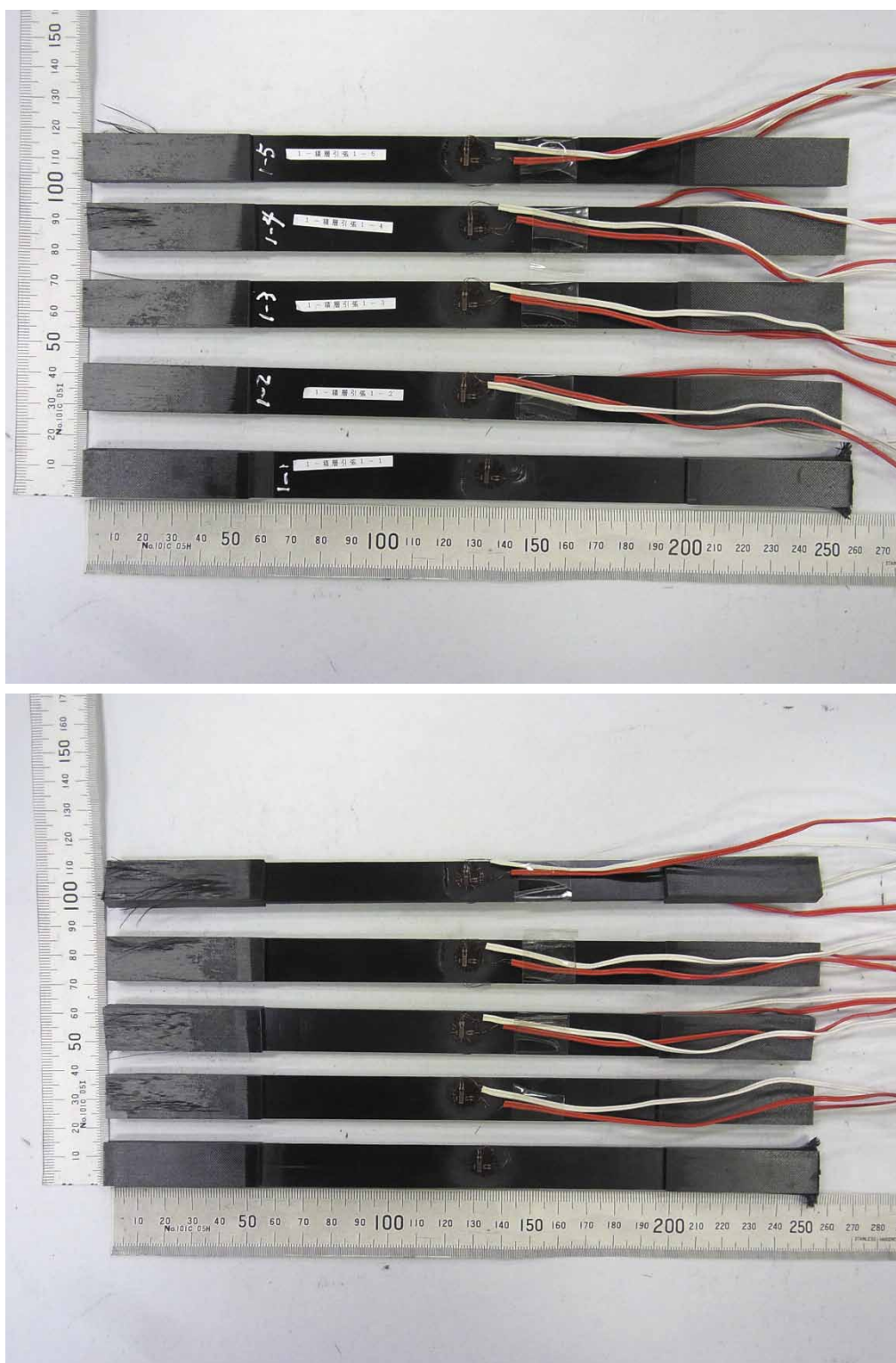


図 A-2 配向角 0° 方向の引張試験が終了した後の試験片(上)表面(下)裏面

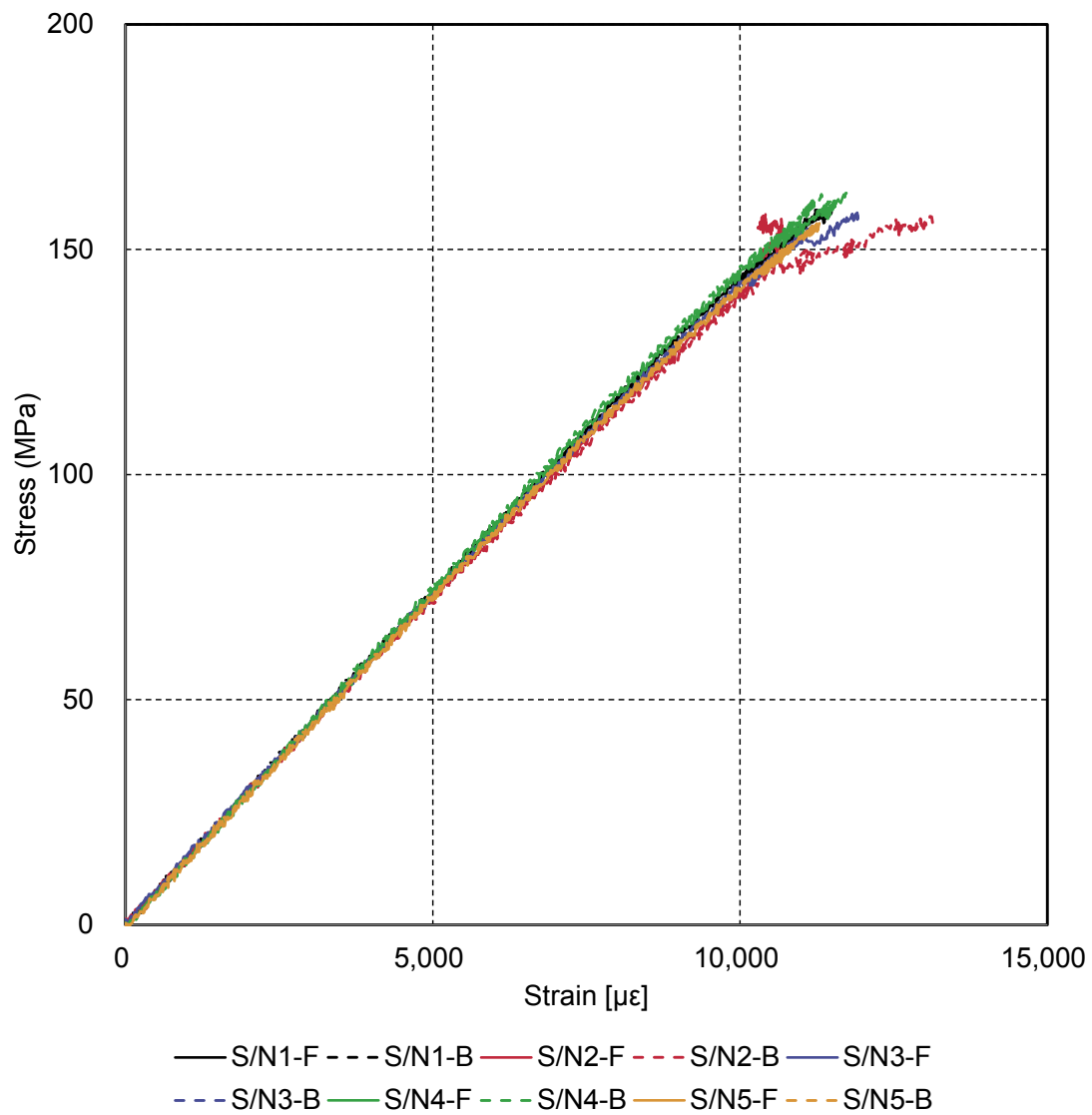


図 A-3 配向角 90°方向、引張試験時の応力－ひずみ線図。凡例の・F は供試体表面、・B は裏面の引張方向ひずみをそれぞれ示す。

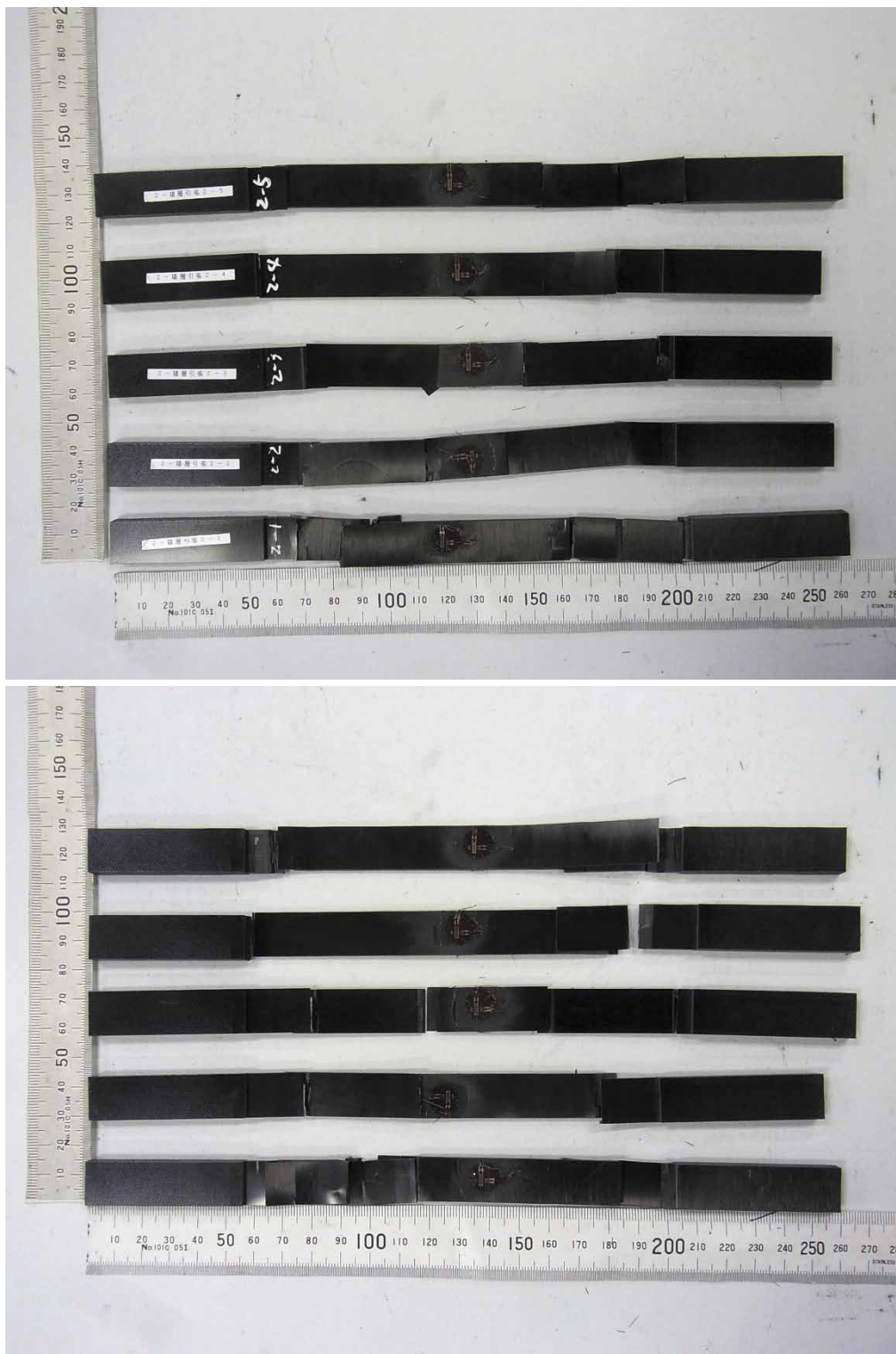


図 A-4 配向角 90°方向の引張試験が終了した後の試験片(上)表面(下)裏面

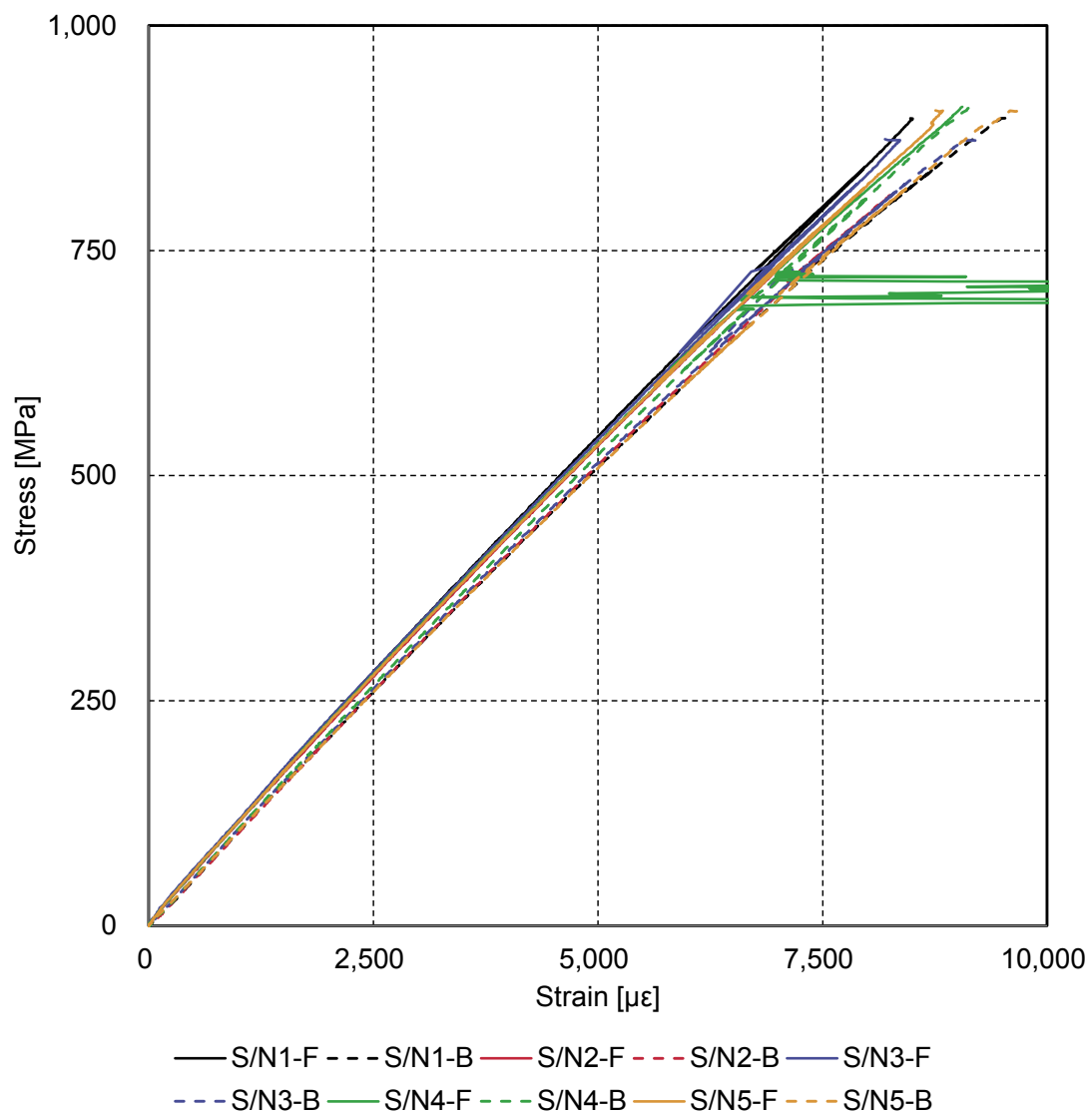


図 A-5 配向角 0°方向、圧縮試験時の応力-ひずみ線図。凡例の-F は供試体表面、-B は裏面の圧縮方向ひずみをそれぞれ示す。

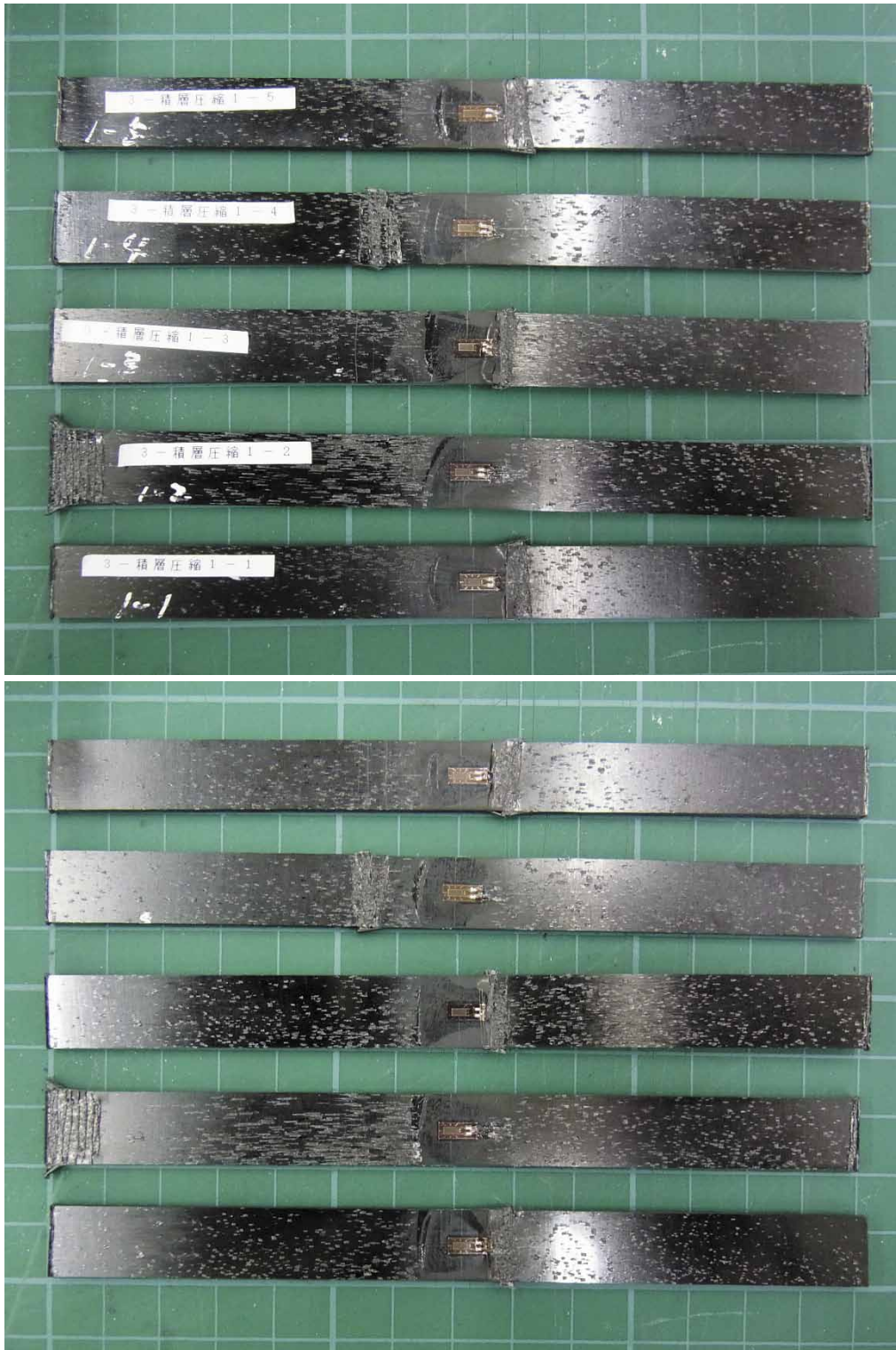


図 A-6 配向角 0°方向の圧縮試験が終了した後の試験片(上)表面(下)裏面

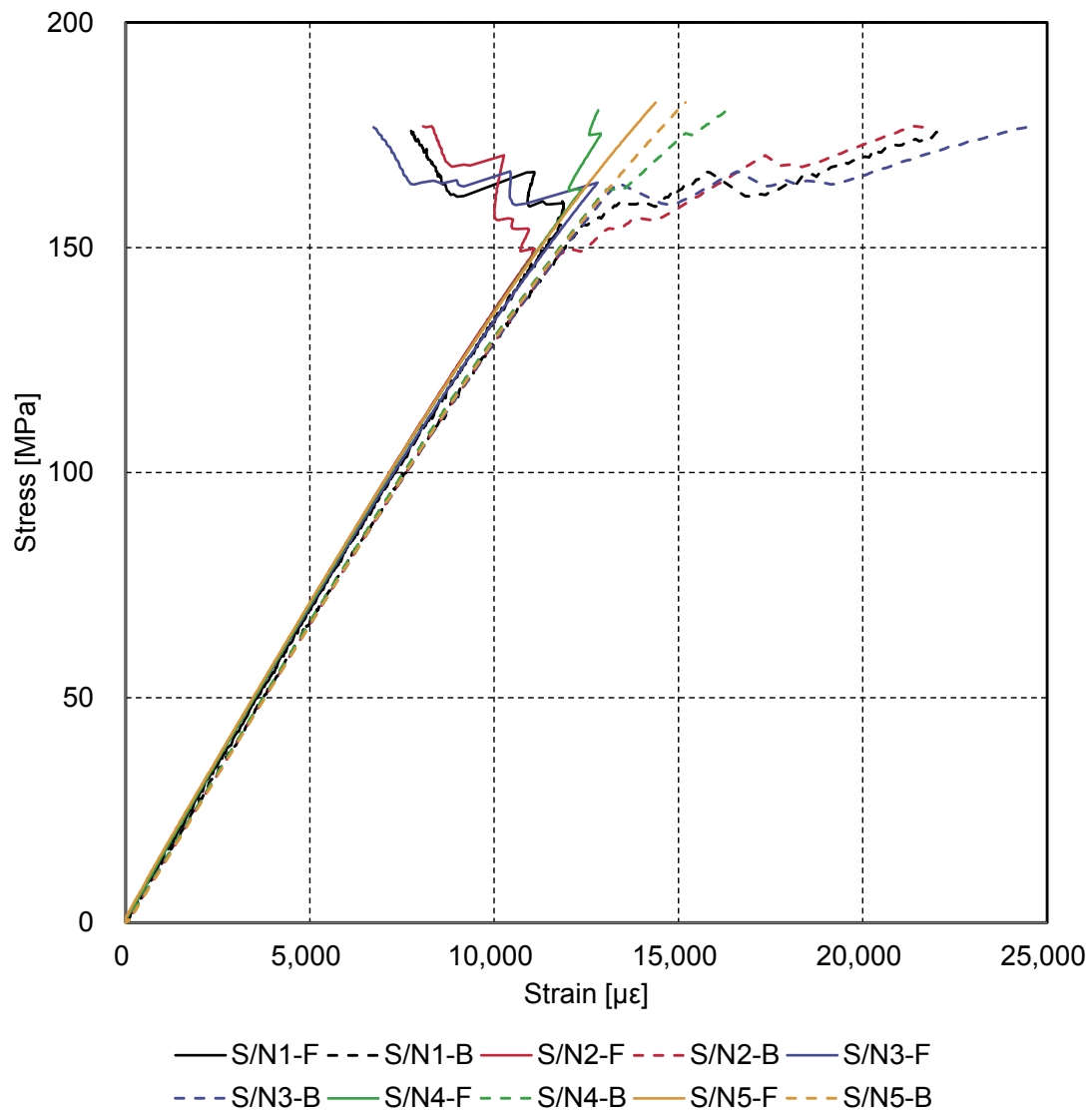


図 A-7 配向角 90°方向、圧縮試験時の応力-ひずみ線図。凡例の・F は供試体表面、・B は裏面の圧縮方向ひずみをそれぞれ示す。



図 A-8 配向角 90°方向の圧縮試験が終了した後の試験片(上)表面(下)裏面

A.4 熱膨張係数

熱膨張係数は表 A-3 に示す積層構成の CFRP 積層板から試験片を切り出して計測した。計測の温度範囲は-150°C から+100°C まで、計測方向は表 A-14 に示すとおり配向角 0°方向および 90°方向である。計測結果を表 A-15 から表 A-17 および図 A-10 に示す。なお、熱膨張係数はレーザ熱膨張計(LIX-2、アルバック理工(株))を用いた変位計測結果を元にして、以下の方法で熱膨張係数を算出した。

各サンプルそれぞれ 2 回の変位計測を行い、計測結果から温度と変位の関係を 3 次の多項式で近似する。次に、以下の式から平均熱膨張係数を求める。

$$\alpha_{20^{\circ}\text{C}}(T) = \frac{\Delta L_T - \Delta L_{20^{\circ}\text{C}}}{L} \frac{1}{T - 20}$$

ここで、 T は温度(単位は°C)、 $\alpha_{20^{\circ}\text{C}}(T)$ は 20°C を基準とした温度 T における平均熱膨張係数、 ΔL_T 、 $\Delta L_{20^{\circ}\text{C}}$ はそれぞれ温度 T と基準温度 20°C における 3 次の近似多項式から求めた変位の平均値、 L は表 A-14 に示すサンプル測定方向の初期長さである。

表 A-14 熱膨張係数を計測した試験片の積層構成、計測方向および寸法。寸法は計測方向の長さを示す。

S/N	積層構成	計測方向	寸法
		deg	mm
1	表 A-3	0	12.049
2	表 A-3	0	12.044
3	表 A-3	90	11.995

表 A-15 試験片 S/N1 の変位と 20°C を基準とした平均熱膨張係数(平均 CTE)

温度 °C	変位 μm			平均 CTE ×10 ⁶ /°C
	1 回目	2 回目	平均値	
-150	-1.311	-1.232	-1.272	0.621
-140	-1.241	-1.158	-1.200	0.622
-130	-1.172	-1.086	-1.129	0.625
-120	-1.102	-1.015	-1.058	0.627
-110	-1.032	-0.945	-0.989	0.631
-100	-0.962	-0.876	-0.919	0.635
-90	-0.891	-0.807	-0.849	0.641
-80	-0.819	-0.739	-0.779	0.646
-70	-0.746	-0.670	-0.708	0.653
-60	-0.671	-0.601	-0.636	0.660
-50	-0.595	-0.532	-0.563	0.668
-40	-0.517	-0.461	-0.489	0.677
-30	-0.437	-0.389	-0.413	0.686
-20	-0.355	-0.316	-0.335	0.696
-10	-0.271	-0.240	-0.256	0.707
0	-0.183	-0.163	-0.173	0.718
10	-0.093	-0.083	-0.088	0.731
20	0.000	0.000	0.000	—
30	0.097	0.086	0.091	0.757
40	0.197	0.175	0.186	0.772
50	0.301	0.268	0.284	0.787
60	0.409	0.365	0.387	0.802
70	0.521	0.466	0.493	0.819
80	0.637	0.572	0.604	0.836
90	0.758	0.682	0.720	0.854
100	0.885	0.798	0.841	0.873

表 A-16 試験片 S/N2 の変位と 20°C を基準とした平均熱膨張係数(平均 CTE)

温度 °C	変位 μm			平均 CTE ×10 ⁶ /°C
	1 回目	2 回目	平均値	
-150	-1.420	-1.353	-1.387	0.677
-140	-1.336	-1.254	-1.295	0.672
-130	-1.253	-1.162	-1.208	0.669
-120	-1.172	-1.075	-1.124	0.666
-110	-1.092	-0.993	-1.042	0.666
-100	-1.013	-0.914	-0.964	0.667
-90	-0.934	-0.839	-0.887	0.669
-80	-0.855	-0.766	-0.811	0.673
-70	-0.776	-0.695	-0.736	0.679
-60	-0.697	-0.624	-0.661	0.686
-50	-0.616	-0.554	-0.585	0.694
-40	-0.535	-0.483	-0.509	0.704
-30	-0.451	-0.411	-0.431	0.716
-20	-0.366	-0.336	-0.351	0.729
-10	-0.279	-0.258	-0.269	0.744
0	-0.189	-0.177	-0.183	0.760
10	-0.096	-0.091	-0.094	0.777
20	0.000	0.000	0.000	—
30	0.100	0.097	0.098	0.817
40	0.203	0.201	0.202	0.840
50	0.311	0.313	0.312	0.863
60	0.424	0.433	0.428	0.889
70	0.541	0.562	0.551	0.916
80	0.664	0.701	0.682	0.944
90	0.792	0.850	0.821	0.974
100	0.926	1.011	0.969	1.005

表 A-17 試験片 S/N3 の変位と 20°C を基準とした平均熱膨張係数(平均 CTE)

温度 °C	変位 μm			平均 CTE ×10 ⁶ /°C
	1 回目	2 回目	平均値	
-150	-22.129	-23.080	-22.605	11.085
-140	-20.783	-21.682	-21.232	11.063
-130	-19.452	-20.295	-19.873	11.045
-120	-18.134	-18.917	-18.525	11.032
-110	-16.828	-17.547	-17.188	11.022
-100	-15.531	-16.185	-15.858	11.017
-90	-14.243	-14.829	-14.536	11.017
-80	-12.959	-13.478	-13.219	11.020
-70	-11.680	-12.131	-11.905	11.028
-60	-10.402	-10.787	-10.594	11.040
-50	-9.123	-9.444	-9.284	11.057
-40	-7.842	-8.103	-7.973	11.078
-30	-6.558	-6.760	-6.659	11.103
-20	-5.266	-5.416	-5.341	11.132
-10	-3.967	-4.069	-4.018	11.166
0	-2.658	-2.718	-2.688	11.204
10	-1.336	-1.362	-1.349	11.246
20	0.000	0.000	0.000	—
30	1.352	1.369	1.361	11.344
40	2.722	2.747	2.735	11.399
50	4.112	4.135	4.123	11.459
60	5.524	5.533	5.529	11.523
70	6.960	6.943	6.952	11.591
80	8.422	8.366	8.394	11.663
90	9.912	9.803	9.858	11.740
100	11.432	11.255	11.344	11.821

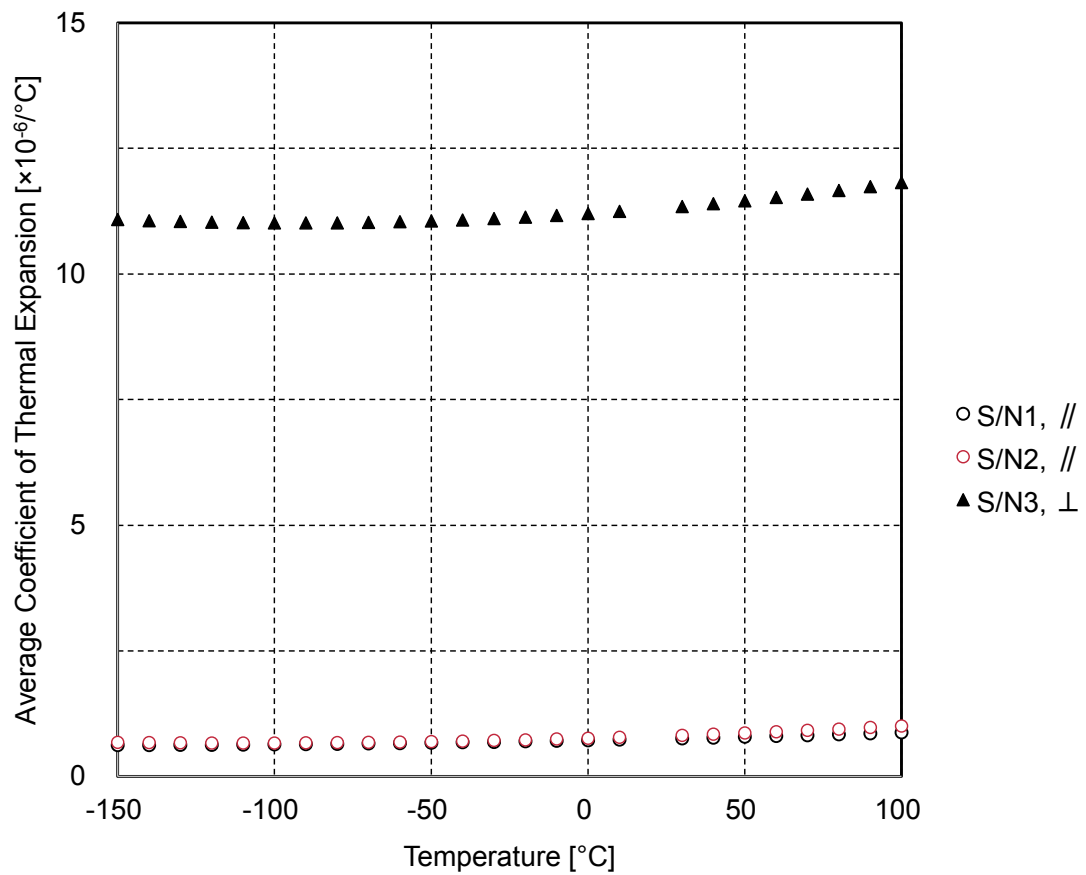


図 A-9 20 $^{\circ}\text{C}$ を基準とした平均熱膨張係数の温度依存性。図中の記号 // は計測方向が炭素繊維の配向角が 0 $^{\circ}$ 方向であることを、記号 ⊥ は 90 $^{\circ}$ 方向であることをそれぞれ示す。

A.5 熱伝導率

熱伝導率は表 A-4 に示す積層構成の CFRP 積層板から試験片を切り出して計測した。計測の温度範囲はおおよそ 3K から 300K までである。試験片の詳細を表 A-18 に、計測結果を表 A-19 から表 A-22、図 A-10 および図 A-11 にそれぞれ示す。計測は物性評価システム PPMS (Quantum Design) を使用して行った。

なお、本計測は次期赤外天文衛星 SPICA に関連する研究活動の一部として行われたものであり[9]、計測は東京大学低温センターにおいて実施した。

表 A-18 熱伝導率を計測した試験片の積層構成、計測方向および寸法。L は計測方向、W はその直交方向、T は積層(板厚)方向の寸法をそれぞれ示す。

S/N	積層構成	計測方向 deg	寸法 mm		
			L	W	T
1	表 A-4	0	8.104	2.086	0.902
2	表 A-4	0	8.115	2.094	0.891
3	表 A-4	90	8.094	2.115	0.987
4	表 A-4	90	8.072	2.095	0.911

表 A-19 試験片(S/N1)の熱伝導率と標準偏差。計測方向は配向角 0°方向。

温度	熱伝導率	標準偏差	温度	熱伝導率	標準偏差
K	W/m/K	W/m/K	K	W/m/K	W/m/K
301.173	4.898	0.482	165.091	2.231	0.105
301.074	5.062	0.490	157.980	2.147	0.094
301.150	4.220	0.469	149.967	2.008	0.084
301.090	4.095	0.463	141.918	1.885	0.073
301.039	4.073	0.463	133.847	1.786	0.064
299.051	3.905	0.466	125.788	1.615	0.054
294.958	4.014	0.443	117.683	1.522	0.047
290.847	3.944	0.426	109.519	1.335	0.038
286.733	3.898	0.415	101.320	1.193	0.033
282.235	3.850	0.399	93.076	1.035	0.026
277.363	3.797	0.384	84.742	0.890	0.021
272.487	3.748	0.369	76.415	0.755	0.017
267.592	3.660	0.352	67.993	0.620	0.013
262.679	3.609	0.337	59.500	0.486	0.009
257.761	3.541	0.321	50.965	0.367	0.007
252.810	3.514	0.308	42.372	0.268	0.006
247.870	3.431	0.293	33.796	0.183	0.006
242.918	3.336	0.277	25.324	0.117	0.005
237.935	3.261	0.264	17.057	0.072	0.002
232.416	3.231	0.250	9.056	0.039	0.002
226.342	3.096	0.233	2.895	0.020	0.001
220.253	3.064	0.219	2.189	0.017	0.000
214.207	2.993	0.206			
208.128	2.898	0.190			
202.019	2.813	0.176			
195.898	2.706	0.163			
189.771	2.621	0.150			
183.635	2.509	0.137			
177.459	2.444	0.126			
171.274	2.341	0.115			

表 A-20 試験片(S/N2)の熱伝導率と標準偏差。計測方向は配向角 0°方向。

温度	熱伝導率	標準偏差	温度	熱伝導率	標準偏差
K	W/m/K	W/m/K	K	W/m/K	W/m/K
300.960	4.011	0.508	165.774	2.226	0.116
300.971	3.914	0.515	159.600	2.153	0.106
300.943	3.882	0.515	153.421	2.038	0.095
299.165	3.655	0.528	146.327	1.967	0.086
295.099	3.799	0.499	138.304	1.806	0.074
290.993	3.767	0.477	130.802	1.708	0.063
286.904	3.714	0.463	124.065	1.568	0.056
282.782	3.689	0.449	117.296	1.489	0.049
278.660	3.657	0.432	110.492	1.348	0.041
274.532	3.600	0.415	103.669	1.227	0.035
270.380	3.589	0.403	96.866	1.100	0.030
266.226	3.531	0.386	90.021	0.965	0.026
262.055	3.485	0.371	83.106	0.868	0.020
257.527	3.436	0.357	76.222	0.750	0.017
252.602	3.390	0.342	69.236	0.637	0.014
247.674	3.339	0.325	62.185	0.524	0.010
242.758	3.243	0.306	55.119	0.423	0.008
237.804	3.209	0.294	48.020	0.335	0.006
232.856	3.181	0.279	40.924	0.260	0.005
227.909	3.039	0.260	33.871	0.190	0.004
222.934	3.068	0.252	26.910	0.129	0.003
217.965	2.976	0.235	20.041	0.090	0.002
213.046	2.943	0.227	13.391	0.066	0.004
208.058	2.860	0.210	7.038	0.048	0.007
202.514	2.765	0.195	3.123	0.022	0.002
196.428	2.679	0.181	2.840	0.022	0.000
190.317	2.605	0.168	2.820	0.022	0.000
184.213	2.511	0.153	2.817	0.014	0.002
178.080	2.414	0.140	3.073	0.000	0.000
171.926	2.333	0.127	3.447	0.020	0.002

表 A-21 試験片(S/N3)の熱伝導率と標準偏差。計測方向は配向角 90°方向。

温度	熱伝導率	標準偏差	温度	熱伝導率	標準偏差
K	W/m/K	W/m/K	K	W/m/K	W/m/K
297.904	0.664	0.197	119.094	0.251	0.035
292.170	0.645	0.190	113.009	0.249	0.032
286.476	0.631	0.184	106.940	0.241	0.028
280.772	0.617	0.178	100.865	0.221	0.025
275.040	0.597	0.170	94.786	0.227	0.022
269.280	0.591	0.165	88.692	0.224	0.019
263.494	0.593	0.162	82.602	0.236	0.017
257.693	0.599	0.159	76.547	0.229	0.014
251.874	0.565	0.150	70.440	0.238	0.012
246.053	0.550	0.144	64.309	0.257	0.011
240.164	0.507	0.133	58.190	0.261	0.010
234.178	0.497	0.128	52.100	0.266	0.011
228.129	0.493	0.124	46.275	0.225	0.013
222.073	0.476	0.118	40.695	0.147	0.008
216.013	0.480	0.114	34.885	0.114	0.007
209.983	0.449	0.106	28.925	0.084	0.005
203.912	0.451	0.102	23.114	0.060	0.004
197.854	0.442	0.097	17.475	0.044	0.002
191.792	0.411	0.090	12.026	0.030	0.001
185.740	0.404	0.085	6.712	0.018	0.001
179.675	0.390	0.080	2.724	0.009	0.000
173.604	0.392	0.076	2.106	0.007	0.000
167.551	0.377	0.071			
161.490	0.348	0.065			
155.433	0.340	0.061			
149.376	0.335	0.056			
143.313	0.322	0.052			
137.254	0.305	0.047			
131.197	0.298	0.043			
125.157	0.263	0.038			

表 A-22 試験片(S/N4)の熱伝導率と標準偏差。計測方向は配向角 90°方向。

温度	熱伝導率	標準偏差	温度	熱伝導率	標準偏差
K	W/m/K	W/m/K	K	W/m/K	W/m/K
296.489	0.516	0.141	84.406	0.268	0.009
295.495	0.147	0.056	76.814	0.246	0.007
289.191	0.489	0.134	69.138	0.232	0.006
282.185	0.497	0.132	61.427	0.215	0.005
275.304	0.499	0.127	53.687	0.189	0.004
268.383	0.496	0.123	45.966	0.151	0.004
261.418	0.490	0.118	38.315	0.116	0.004
254.398	0.493	0.114	30.742	0.085	0.003
247.352	0.485	0.109	23.357	0.060	0.002
240.279	0.484	0.105	16.256	0.041	0.001
233.148	0.482	0.099	9.442	0.024	0.001
225.997	0.488	0.095	3.573	0.012	0.001
218.840	0.474	0.089	2.352	0.008	0.000
211.722	0.458	0.083	2.197	0.008	0.000
204.468	0.459	0.078			
197.167	0.456	0.073			
189.836	0.444	0.067			
182.459	0.433	0.061			
174.994	0.425	0.056			
167.515	0.417	0.051			
159.987	0.396	0.045			
152.458	0.387	0.041			
144.927	0.361	0.035			
137.399	0.357	0.031			
129.865	0.339	0.027			
122.320	0.338	0.024			
114.757	0.316	0.020			
107.177	0.319	0.017			
99.586	0.304	0.015			
92.014	0.281	0.012			

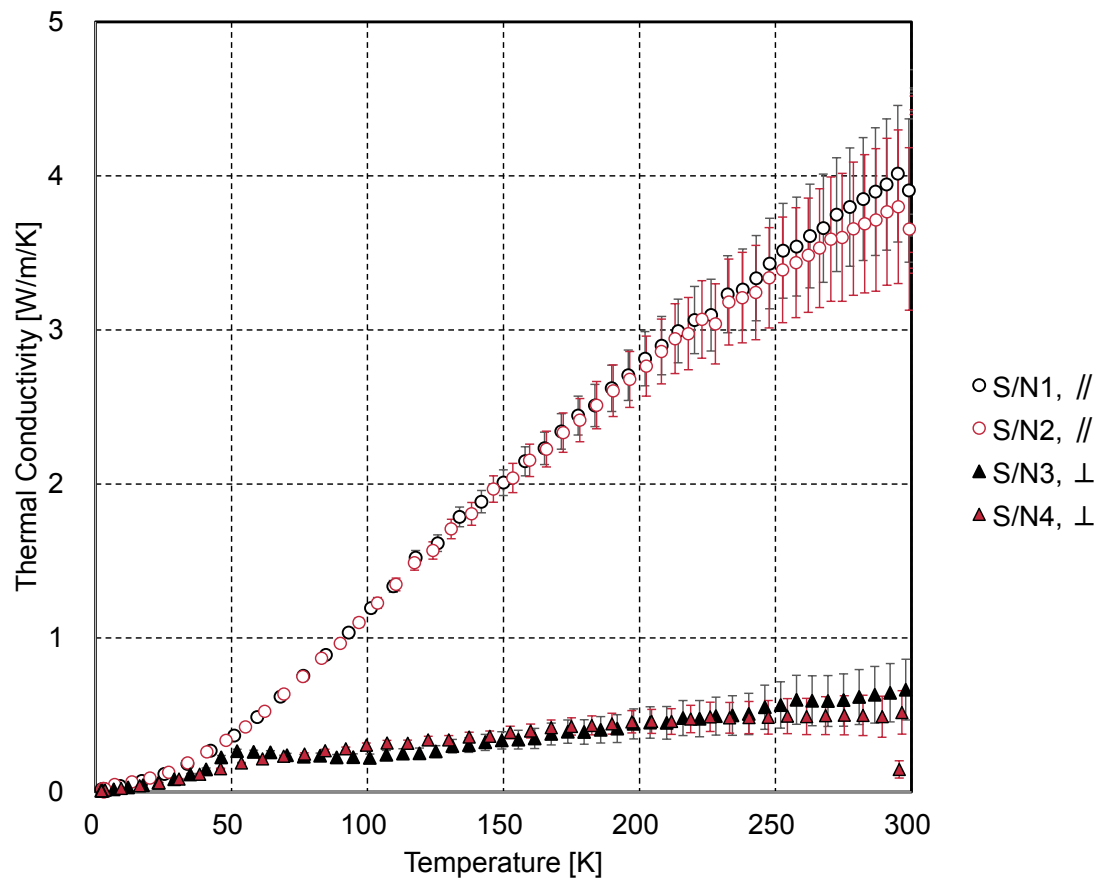


図 A-10 熱伝導率の計測値。// は炭素繊維と平行方向、⊥ は炭素繊維と直交方向の計測値を示す。また、エラーバーは熱伝導率計測値の標準偏差(1 σ)を示す。

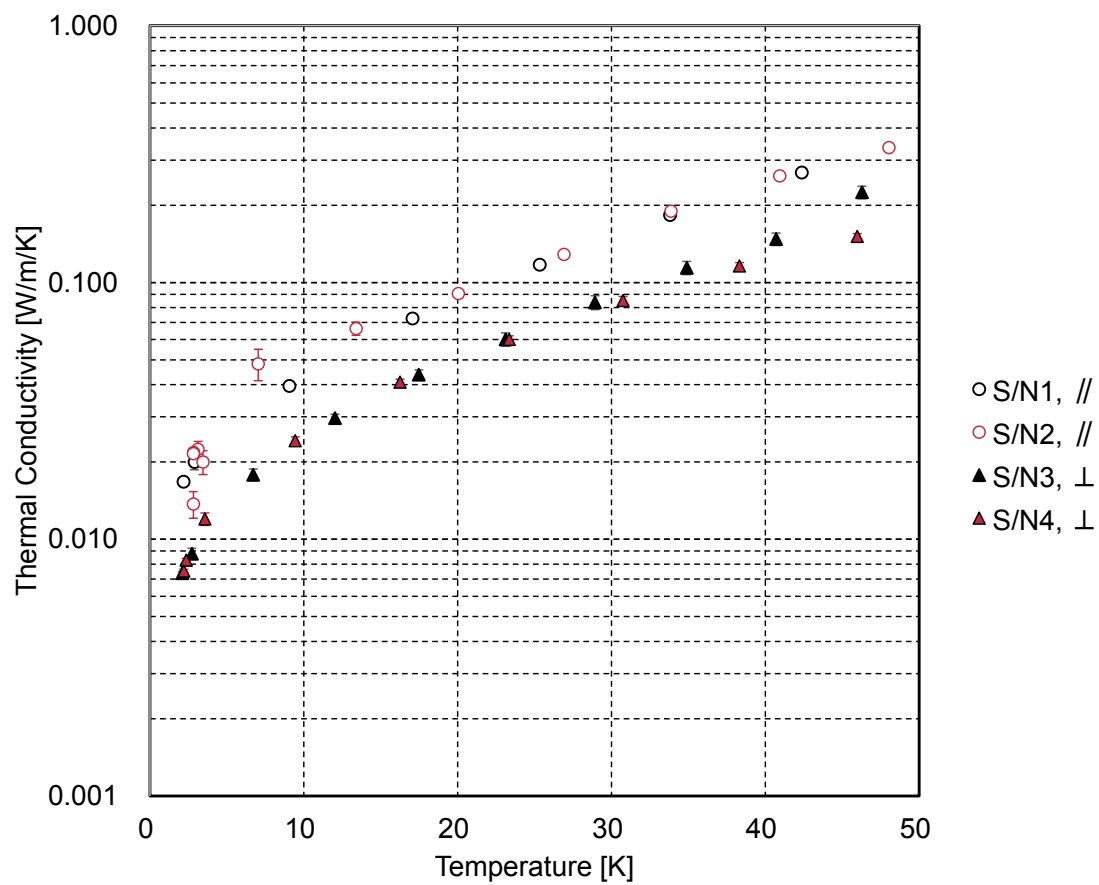


図 A-11 図 A-10 の 50K 以下を拡大した図。縦軸は対数軸表示である。

A.6 半球方向輻射率

半球方向輻射率は表 A-2 の材料を成型した CFRP 平板にアルミ蒸着マイラーを施工した状態で計測を行った。計測環境は室温である。測定結果を表 A-23 に示す。S/N1 から 3 までの試験片は、CFRP 成型時にマイラーフィルムをオートクレーブでコキュアし製造し、S/N4 は成型後の CFRP 平板にマイラーフィルムをスプレー糊で接着している。また、オートクレーブで成型した試験片のうち、S/N1 および 2 は表面仕上げにフィルムを用いており、S/N3 はブリーザーを使用している。計測は住友重機械工業(株)で実施した。

表 A-23 アルミ蒸着マイラー施工後の CFRP 半球方向輻射率測定結果

S/N	半径方向 輻射率	マイラー 穴加工	成型方法	成型時 表面仕上げ
1	0.0292	有	オートクレーブ (コキュア)	フィルム
2	0.0252	同上	同上	同上
3	0.1405	同上	同上	ブリーザー
4	0.0322	同上	スプレー糊による接着	N/A

参考文献

- [1] T. Mizutani, T. Yamawaki, K. Komatsu, K. Goto, S. Takeuchi, K. Shinozaki, H. Matsuhara, and T. Nakagawa, “Preliminary structural design and key technology demonstration of cryogenic assembly in the next-generation infrared space telescope SPICA,” *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* 1(2), 027001, 2015.
- [2] 檜崎勝弘, “断熱装置”, 特許 5475066 号, 2014.
- [3] 高井茂希, 辻英俊, 岡林明伸, 恒松正二, 檜崎勝弘, 水谷忠均, 神谷友裕, 篠崎慶亮, “30K 以下の極低温領域における宇宙機用 低熱伝導 3 重管トラスの開発”, 第 58 回宇宙科学技術連合講演会, 2E15, 2014.
- [4] 住友重機械工業株式会社, “極低温環境における低熱伝導 3 重管トラスの開発 成果報告書”, TTIS-ER0001, 2013.
- [5] 住友重機械工業株式会社, “極低温環境における低熱伝導 3 重管トラスの開発(その 2) 成果報告書”, TTIS-ER0002, 2014.
- [6] 住友重機械工業株式会社, “極低温低熱伝導 3 重管トラス 30-100K 領域熱特性の計測手法の開発 成果報告書”, TTIS-ER0003, 2015.
- [7] 北本和也, 神谷友裕, 水谷忠均, “3 重管トラスにおける CFRP/金属継手強度について”, 第 57 回構造強度に関する講演会, 2B08, 2015.
- [8] B. Comber and S. Glazer, “James Webb Space Telescope integrated science instrument module calibration and verification of high-accuracy instrumentation to measure heat flow in cryogenic testing,” *Proc. 42nd International Conference on Environmental Systems*, AIAA 2012-3560, 2012.
- [9] K. Shinozaki, T. Mizutani, T. Fujii, T. Onaka, T. Nakagawa and H. Sugita, “Thermal property measurements of critical materials for SPICA payload module,” *Physics Procedia* 67, 270-275, 2015.

謝辞

本研究の実施には住友重機械工業(株)のご協力をいただきました。また、CFRP パイプの設計および製造ではシキボウ(株)のご協力をいただきました。

付録の材料物性値取得試験のうち、引張および圧縮特性取得試験では JAXA 航空本部複合材技術研究センターの吉村彰記博士に、熱伝導率取得試験では東京大学低温センターの藤井武則博士、東京大学大学院理学系研究科の尾中敬教授に多大なるご協力をいただきました。厚く御礼申し上げます。

