

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

極低温環境力学特性用試験設備の開発 (その2：二軸力学特性試験)

Development of a test facility for measuring the mechanical
properties of materials under cryogenic environment
-2nd Report : biaxial mechanical property testing

熊澤 寿, 高戸谷 健
Hisashi Kumazawa, Takeshi Takatoya

2016年2月

February 2016

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

極低温環境力学特性用試験設備の開発(その2：二軸力学特性試験)

熊澤 寿*1、高戸谷 健*2

Development of a test facility for measuring the mechanical properties of materials under cryogenic environment -2nd Report : biaxial mechanical property testing

Hisashi Kumazawa*1, Takeshi Takatoya*2

Abstract

Recently, the applications of composite materials to the cryogenic propellant tank structures are under consideration to improve performance of rockets. It is necessary to clarify effects of cryogenic environment of liquefied propellant on the characteristics of the composite materials for the propellant tank application. Biaxial mechanical properties of the composite materials are also important for the tank structure subjected to internal pressure and structural loading in addition to the thermal loading at cryogenic temperature. In Aeronautical Technology Directorate, Japan Aerospace Exploration Agency, biaxial mechanical properties of materials had been evaluated with a biaxial fatigue testing machine at room temperature until now. For the purpose of cryogenic biaxial evaluation of the composite materials, a cryogenic environmental chamber has been newly developed. This report summarizes the development of a cryogenic environmental chamber for biaxial mechanical property testing. The cryogenic environmental chamber that a cruciform specimen could be applied biaxial load under cryogenic temperature was designed based on the findings summarized in the previous report. In this report, experimental procedure and results of performance tests are also summarized.

概要

近年、ロケット等の性能向上のための重量軽減を目的として、推進剤タンク構造の複合材料化の検討が進められている。推進剤タンク構造の複合材料化においては、液化推進剤による極低温環境が複合材料の特性に及ぼす影響を明らかにする必要がある。極低温の熱荷重に加えて内圧や構造荷重を受けるタンクに複合材料を適用する上で、複合材料の二軸特性評価も重要となってくる。宇宙航空研究開発機構航空技術部門では、これまで二軸疲労試験機を用いた材料の二軸特性の評価を常温で実施してきた。今回、複合材料の極低温二軸特性評価の実施を目的として、新規に極低温環境槽を開発した。本報告は、

* 平成 27 年 12 月 16 日受付 (Received December 16, 2015)

*1 航空技術部門 構造・複合材技術研究ユニット
(Structures and Advanced Composite Research Unit, Aeronautical Technology Directorate)

*2 航空技術部門 次世代航空イノベーションハブ
(Next Generation Aeronautical Innovation Hub Center, Aeronautical Technology Directorate)

二軸力学特性試験用極低温環境槽システムの開発についてまとめたものである。前報で報告した単軸用の極低温環境槽の開発で得られた知見をもとに、極低温において十字型試験片に二軸負荷ができる極低温環境槽システムの設計を行った。本報告では、試験手順と性能試験結果についてもまとめた。

1 はじめに

大型ロケットは、エンジン、極低温推進剤タンク、フェアリング等から構成されており、それらの構成品の中でも大型ロケット重量に占める推進剤タンクの割合は非常に高く、推進剤タンクの軽量化は、ロケットの大幅な重量軽減が可能であり、宇宙輸送用大型ロケットの打ち上げ能力向上に非常に効果的である。極低温推進材タンクの軽量化材料として、航空機構造などにも多く適用されている炭素繊維複合材料が有望視されている。また、複合材料製の極低温タンクに関する技術は、大型ロケットだけでなく、液体水素等の極低温燃料を用いる将来の航空機の軽量化にも大きく寄与すると考えられる。

米国では1990年代、NASAが再使用型宇宙往還機の無人実験機X-33(図1.1)の開発¹⁾を進めており、機体の軽量化に複合材料製極低温推進剤タンクを採用した。X-33用大型極低温複合材タンクの開発過程において、液体水素を使用した構造試験時にタンクの破壊が発生した。このタンク破壊の原因調査の結果、積層板に発生した樹脂割れが原因であり、タンク構造において強度だけでなく、樹脂割れに伴う推進剤の漏えい特性も重要であることが明らかとなった²⁾。

航空宇宙分野における複合材構造の開発では、実大構造試験、コンポーネント試験、サブコンポーネント試験、エレメント試験、クーポン試験等からなるビルディングブロックアプローチの手法が適用されることが一般的である。極低温複合材料製タンクの開発における漏えい特性に関して、クーポン試験や実大/コンポーネント試験が行われているが、その間を補間するエレメント試験に相当する漏えい特性試験が不足している。

そのような極低温推進剤タンクの漏えい特性に関するエレメント試験の一つとして、JAXAでは、二軸疲労試験機(以下「二軸試験機」と言う。)を用いて積層板の漏えい特性の取得を行ってきた。タンク構造のビルディングブロックアプローチにおける二軸試験の位置づけを図1.2に示す。これまで行われてきた基礎的な研究からスケールタンクモデルについての試験等については前報「極低温環境力学特性用試験設備の開発(その1：単軸力学特性試験)³⁾」の1.1章に記述を行った。前報の後に動きのあった主な極低温タンク関連の海外の研究開発について以下に示す。

2010年より、NASAがCCTD(Composite Cryotank Technologies and Demonstration)プログラムを進めている⁴⁾。このCCTDプログラムでは、複合材料の推進剤タンクへの適用に向け、脱オートクレーブ(Out of Autoclave)製法やライナーレス様式を適用することにより、軽量アルミリチウム合金構造と比べ、25%のコスト低減、30%の質量低減を目標としている。最終的な機体仕様である直径8.4mの極低温複合材料タンクの実現に向け、直径2.4mおよび直径5.5mの複合材タンク(図1.3)をボーイングにて製造し、その実証試験を目指している⁵⁾。直径2.4mタンクに対しては、MSFC(Marshall Space Flight Center)において液体水素を用いた圧力負荷試験を実施しており、液体水素温度において内圧135psi(約0.93MPa)を20サイクル加圧後、漏えいなく耐荷したとの報告がなされている⁶⁾。

EUでは、2012年よりCHATT(Cryogenic Hypersonic Advanced Tank Technologies)プロジェクト⁷⁾が開始され、ドイツのDLR、オランダのTU DelftとALE、スウェーデンのSICOMPなどが複合材料製極低温タンクの開発に着手した(図1.4)^{8) 9)}。CHATTプログラムでは、CFRP複合形状(Multi Bubble)タンク、樹脂ライナー付きCFRPタンク、フィラメントワインディングCFRPタンクなどについて各参加組織がCFRP実証タンク構造の設計・製作に着手した。今後、極低温での加圧試験が行われる予定である。

JAXA において二軸試験機を用いた研究が継続的に行われてきた。これまでに、全ての層に樹脂割れが発生した積層板に対する漏えい測定が常温にて行われており、損傷密度、二軸負荷、積層構成をパラメータとして、複合材積層板のガス漏えい特性が評価された^{10, 11)}。しかし、二軸試験機用極低温環境槽が無く、複合材料製極低温タンクの設計開発に重要な極低温における漏えい試験データが取得できていないことが課題であった。

二軸試験機を用いた積層板の漏えい特性試験で、これまで取得できていない極低温における漏えい試験データは、複合材料製極低温タンクの設計開発に重要であり、データの蓄積が望まれている。そのため、極低温における漏えい試験データの測定を目標とした極低温環境二軸力学特性用試験設備の開発を進めている。

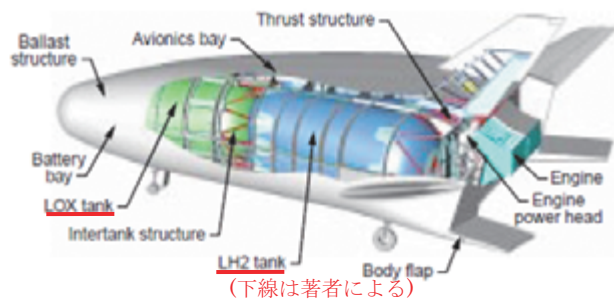
十字型二軸試験に用いることができる極低温環境槽の開発には、多くの技術的課題があり、それらの技術的課題を着実に解決することを目的として、まずは極低温環境槽プロトタイプとしての単軸力学特性試験用極低温環境槽の開発を行った。

前報³⁾において、それらの開発を詳細にまとめている。単軸力学特性試験用極低温環境槽の開発結果をふまえて、十字型二軸力学特性試験用極低温環境槽(以下「極低温環境槽」と言う。)の開発を行った。

本報告書では、極低温環境槽の検討および開発方針について2章にまとめた。3章では極低温環境槽の概要や構成についてまとめ、4章では二軸負荷を試験片に加えるための二軸試験機についてまとめた。極低温環境槽の試験手順について5章にまとめ、極低温環境槽の性能実証のために実施した性能確認試験結果を6章に示した。最後に、本報告書のまとめを7章に示した。



(a) 外観



(b) タンクを含めた内部構造

図 1.1 再使用型宇宙往還機の無人実験機 X-33¹⁾

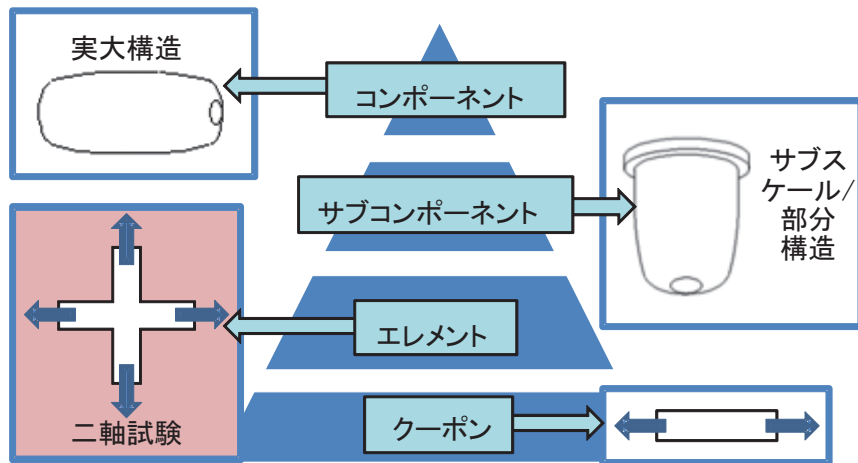
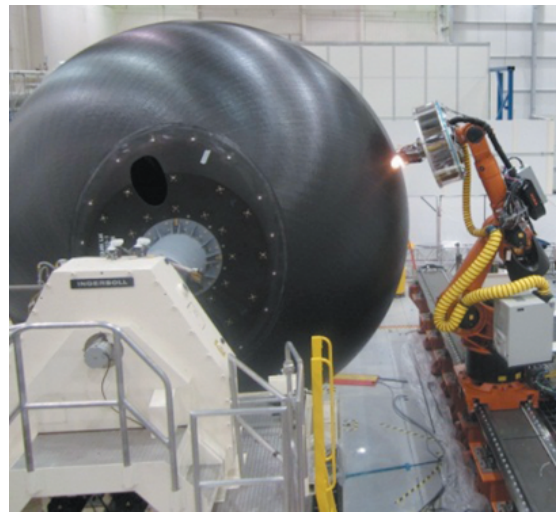


図 1.2 タンク構造におけるビルディングブロックアプローチ概要図

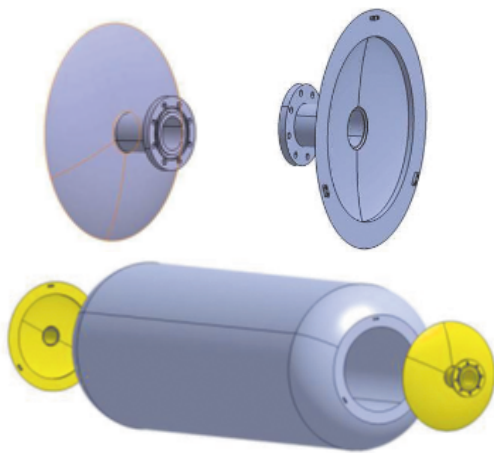


(a) 直径 2.4m タンク

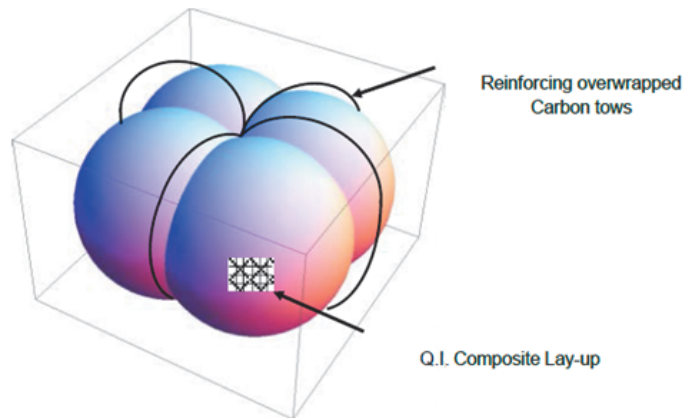


(b) 直径 5.5m タンク

図 1.3 NASA CCTD プログラムでの複合材製タンク製造⁵⁾



(a) DLR の CFRP タンク



(b) TU Delft の CFRP タンク

図 1.4 CHATT プログラム極低温 CFRP タンクモデル⁸⁾

2 極低温環境槽の検討および開発方針

二軸試験機を用いた積層板の漏えい特性試験で、これまで取得できていない極低温における漏えい試験データは、複合材料製極低温タンクの設計開発に重要であるため、極低温環境二軸力学特性用試験設備は、極低温での力学的特性のための試験とともに、極低温における漏えい特性試験も考慮して開発を行う必要がある。極低温環境二軸力学特性用試験設備の課題は以下の三点である。

- (a) 試験片の極低温への冷却
- (b) 試験片への二軸負荷
- (c) 試験片のガス漏えい特性の測定

上記の(a)の課題については、極低温推進剤である液体酸素温度(-183℃)と液体水素温度(-252.6℃)の環境で試験を行うため、液体水素温度での冷却を目標としている。(b)の課題は、試験片評定部を極低温に冷却しつつ、十字型試験片の4つの端部を試験機に結合し二軸負荷を行わなければならないという技術課題である。(c)の課題は、(a)の試験片の冷却と(b)の試験片への二軸負荷をしつつ、ガス漏えい測定を行わなければならないという技術的課題である。

前報³⁾において、上記(a)および(c)の課題を考慮した結果、伝熱材を用いた冷凍機による冷却を行い、評定部の真空断熱は評定部近傍を密閉し、試験片端部は負荷のために密閉空間の外部に出す方式を二軸試験機用冷凍機式極低温環境槽に適用することとした。上記(b)の課題も含めた二軸試験機用冷凍機式極低温環境槽についての具体的な技術的課題をまとめると、以下の4点となる。

- (1) 伝熱線を介して冷凍機と試験片評定部を熱的につなげること
- (2) 断熱のために冷凍機の極低温部と試験片評定部の周りを高真空に保つこと
- (3) 試験片評定部を高真空に保ちつつ十字型試験片の4つの端部を試験機に力学的に結合すること
- (4) 試験片破壊時に、試験片と伝熱線で結ばれた冷凍機と試験片評定部を覆っている環境槽を損傷させないこと

上記4つの課題のうち(1)、(2)、(4)の課題と、(3)の課題の代わりに短冊試験片の端部を試験機に結合する課題を、すでに開発した単軸試験用極低温環境槽システムにおいて、解決の目途をつけることができている。前報(その1)³⁾で解決した課題と今回解決する課題を表2.1にまとめた。また、今回の開発における冷却温度の目標を液体窒素温度(-196℃)とした。

二軸力学特性試験用極低温環境槽システムの開発において、単軸試験用極低温環境槽システムで得られた知見をもとに、上記(1)、(2)、(3)、(4)の課題の解決を行った。

(3)の課題は、本開発で初めて取り組む課題であり、本章で検討結果を示す。本開発においては図2.1に示す形状の十字試験片を対象として、試験片中央80mm角の領域を冷却領域とした。

単軸試験用極低温環境槽では、試験片評定部を高真空に保ちつつ短冊型試験片の両端部を試験機に力学的に結合することで課題を克服した。単軸用極低温環境槽においては、図2.2に示すように短冊試験片の両端に伸び縮みするベローズが取りついており、内部を真空に保ち、試験片中央評定部を冷却していた。引張試験時の破壊が図2.2のように起こった場合、ベローズが伸びることにより、内部を真空に保ち、破壊の衝撃が極低温環境槽に加わることを避けている。

しかし、図2.1のような十字型試験片の場合、破壊は単純ではなく、図2.3に示すように荷重軸に直

角方向に動く変形もある。そのため、図 2.4 のように十字試験片の環境槽の各腕部にそれぞれベローズを取り付けた場合、ベローズは破壊時の軸方向の移動には追従するが、軸に直角方向の動きに対応できずに、環境槽に大きな負荷を加えることとなる。さらに、このような機構において、4つのベローズを取り付けた環境槽上部に十字型試験片を取り付ける機構が複雑となり、取り付け手順の複雑さや取り付け時間の増大などのデメリットがある。

そこで、試験片の取り付け部の構造が複雑で無く、試験片取り付け方法が簡易でありながら、冷却時に試験片評価部を断熱のために真空を保ち、試験片破壊時に冷凍機を取り付けた環境槽下部の保護を行うことのできる方式を検討した。

図 2.5 中の写真に示すように十字型試験片自体に評価部を囲むようなシーリングを取り付ける方法を考案した。図 2.5 に示すようなシーリングに対して、下側にシーリングと同じ四角い形状の開口部を持つ環境槽と、上側にシーリングと同じ四角い形状の開口部を持つ蓋により、試験片のシーリングを挟み込むように設置し、試験片評価部周辺を断熱のための真空状態に保つことができる。図 2.3 のような試験片破壊時に対しては、図 2.5 に示すように十字型試験片の破壊が生じても、試験片に取り付けたシーリングが横方向にスライドし、環境槽に力加わらず、冷凍機を取り付けた環境槽下部の保護を実現することができる。上記のような試験片評価部を囲むシーリングを十字型試験片に直接取り付ける方針で極低温環境槽の開発を行うこととした。

表 2.1 技術課題と解決状況

課題	技術課題	解決
(a) 試験片の極低温への冷却 (本報告での目標: 液体窒素温度)	(1) 伝熱線を介して冷凍機と試験片評価部を熱的につなげること	(その1) ³⁾ で解決
	(2) 断熱のために冷凍機の極低温部と試験片評価部の周りを高真空に保つこと	(その1) ³⁾ で解決
(b) 試験片への二軸負荷	(3) 試験片評価部を高真空に保ちつつ十字型試験片の4つの端部を試験機に力学的に結合すること	本報告(その2)で解決
	(4) 試験片破壊時に、試験片と伝熱線で結ばれた冷凍機と試験片評価部を覆っている環境槽を損傷させないこと	(その1) ³⁾ で部分的に解決 本報告(その2)で最終的に解決
(c) 試験片のガス漏えい特性の測定	(今後、技術課題の詳細検討を実施予定)	

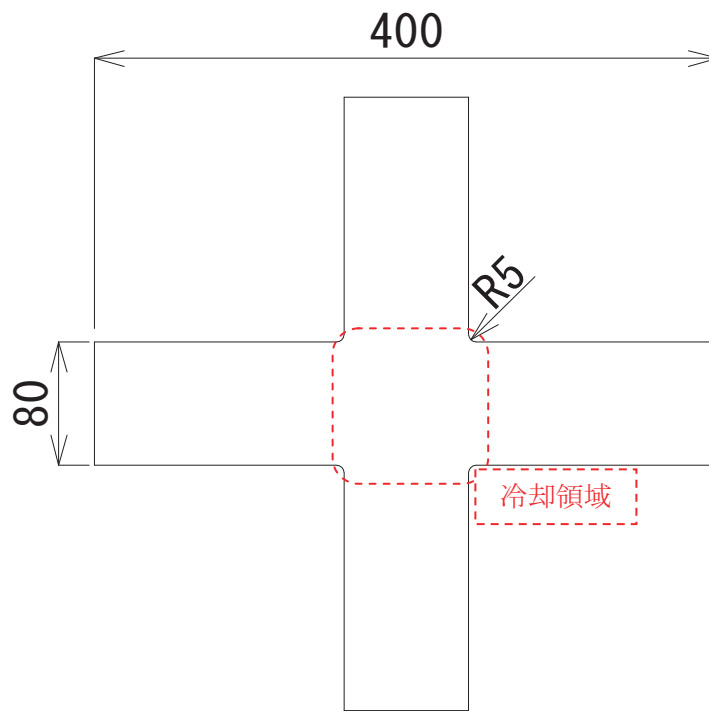


図 2.1 十字型二軸試験片(単位:mm, 板厚 2mm)

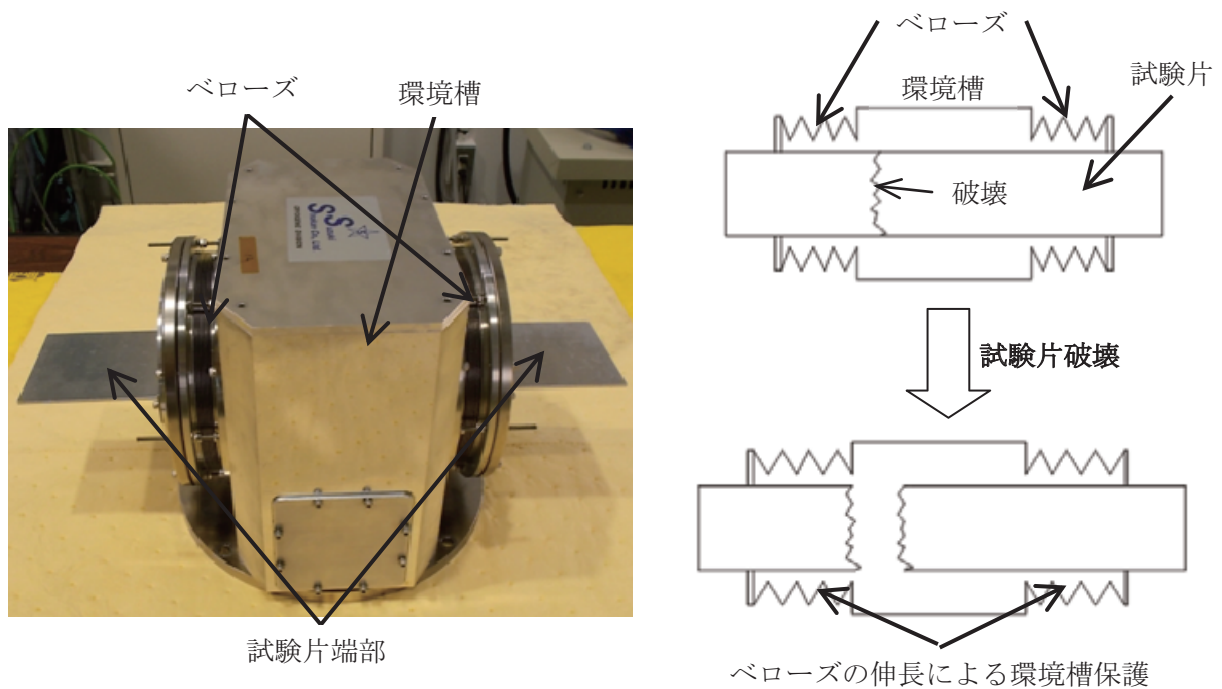


図 2.2 単軸試験用極低温環境槽における環境槽保護

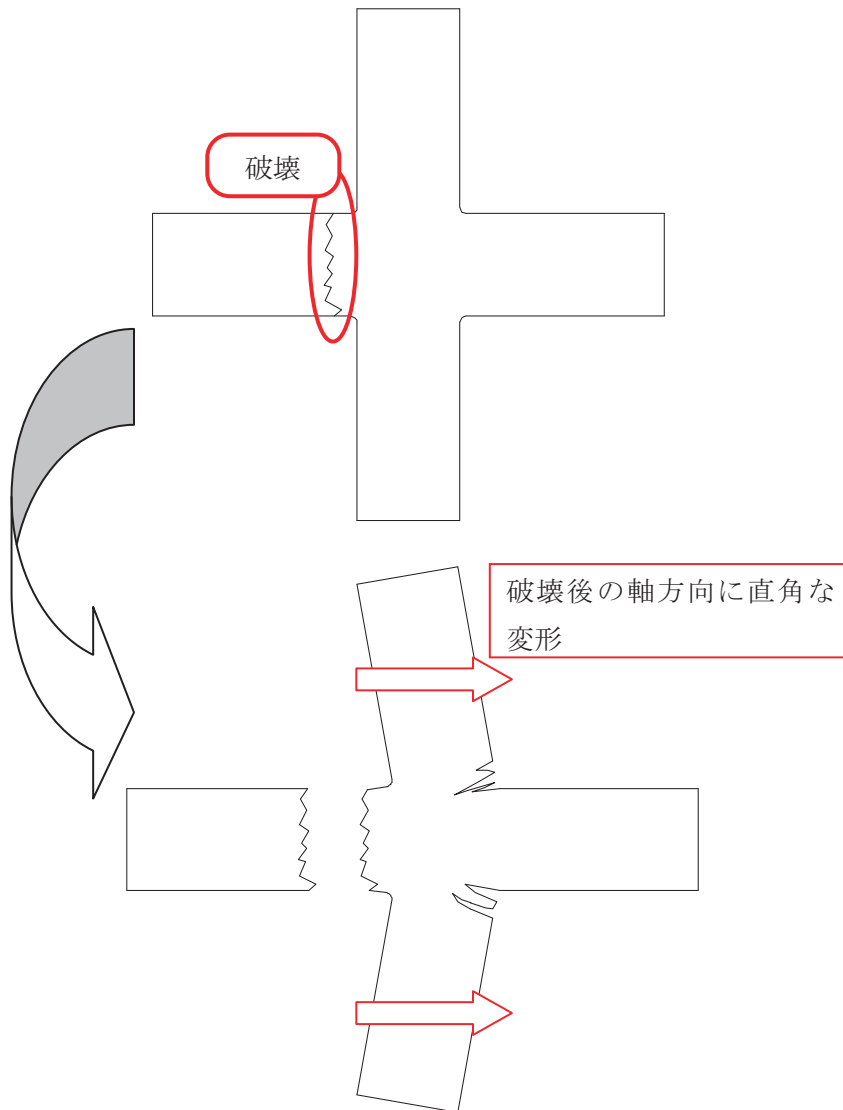


図 2.3 破断時の十字型試験片の変形(想定図)

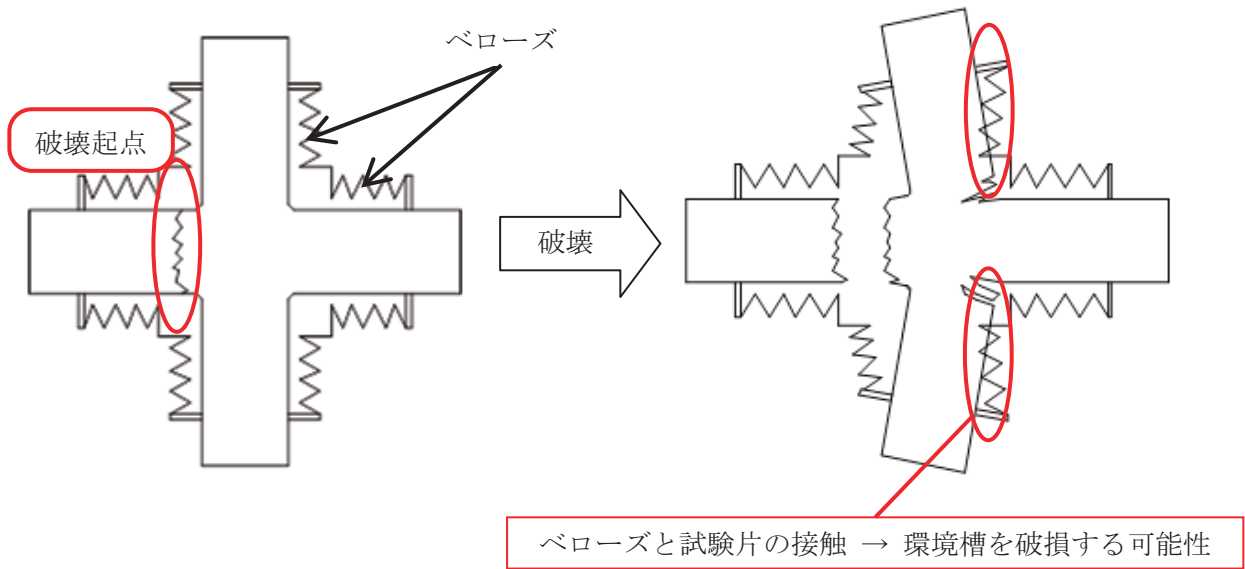


図 2.4 二軸試験用極低温環境槽にベローズ機構を適用した場合の問題点

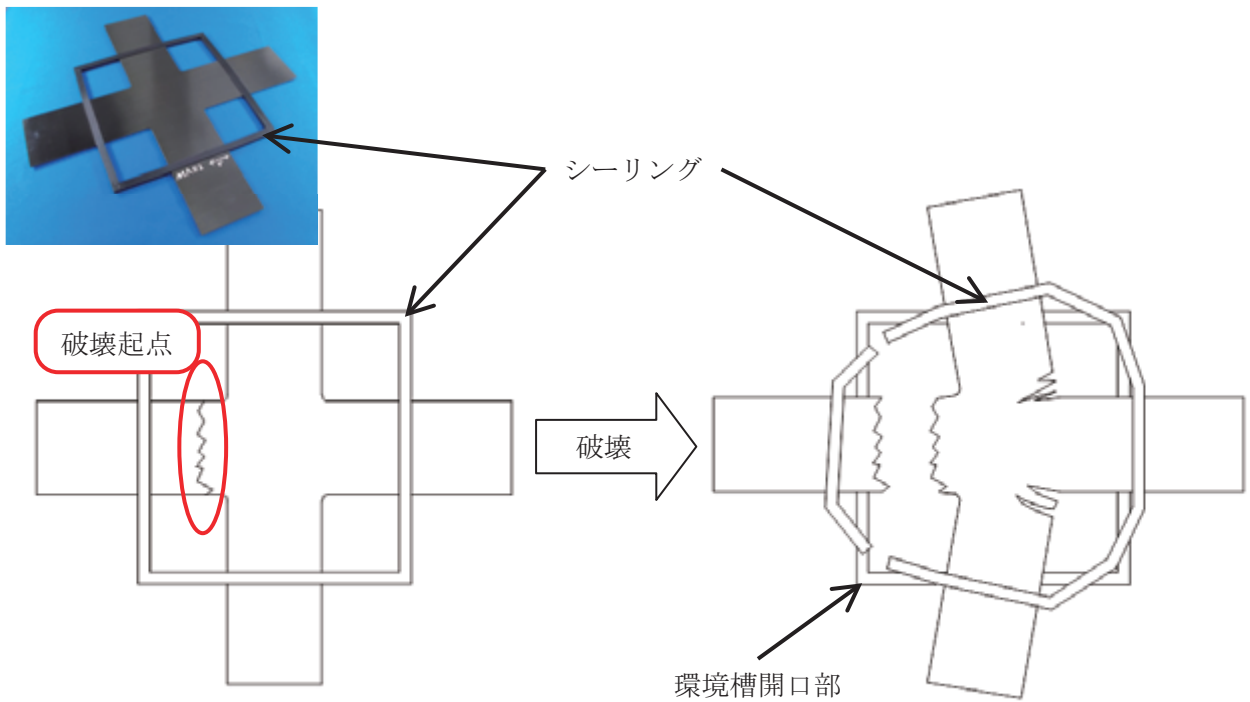


図 2.5 角形シーリングを取り付けた試験片の破壊

3 極低温環境槽の構成

3.1 極低温環境槽概要

2章で定めた開発方針に従い、極低温環境槽システムの開発を行った。開発において、温度センサアンプとチラーは既存の物を使用することとした。

開発した極低温環境槽システムは、環境槽、伝熱部材、冷凍機、圧縮機、排気装置、圧力センサ/アンプ、温度センサ/アンプから構成される。極低温環境槽の概要及び構成品の写真を、それぞれ図 3.1 と図 3.2 に示す。試験片の冷凍機による冷却と二軸試験機による負荷の概要を図 3.3 に示す。

冷凍機の低温部が伝熱部材を冷却し、その冷却された伝熱部材が試験片の冷却を行う。伝熱部材は、冷凍機の低温部に取り付けられている冷却棒、コールドヘッドプレート、伝熱線、冷却プレートから構成される。冷凍機は、冷凍機を駆動するための圧縮機に接続されており、その圧縮機はチラーによって冷却されている。環境槽内は、試験片評定部を断熱するために、排気装置により高真空に保たれる。環境槽内の圧力と試験片の温度は、それぞれ圧力センサ/アンプと温度センサ/アンプにより測定される。試験片への二軸負荷は、二軸試験機によって加えられる。

環境槽内の試験片評定部は上下から 2 枚の冷却プレートにより挟まれており、その冷却プレートは伝熱線等の伝熱部材を介して冷凍機の低温部に熱的に接続されている。極低温環境槽は二軸試験機の中央部に設置され、極低温に保持された評定部を持つ十字型試験片に二軸負荷を加える。二軸試験機は、水平に設置した十字型試験片の中央部が変位しないように、向かい合う二組の十字型試験片の腕を両側からアクチュエータにより同時に負荷する機構となっている。極低温となっている十字型試験片の中央評定部は環境槽内にあるが、十字型試験片の腕部の端部は環境槽外に露出しており、その露出している端部を二軸試験機の油圧グリップでつかみ、十字型試験片に二軸負荷を加える。

開発した極低温環境槽と二軸試験機から構成される試験設備の緒元を表 3.1 に示す。表 3.1 の各項目については、3.2 章から 3.5 章、4 章で詳細を示す。

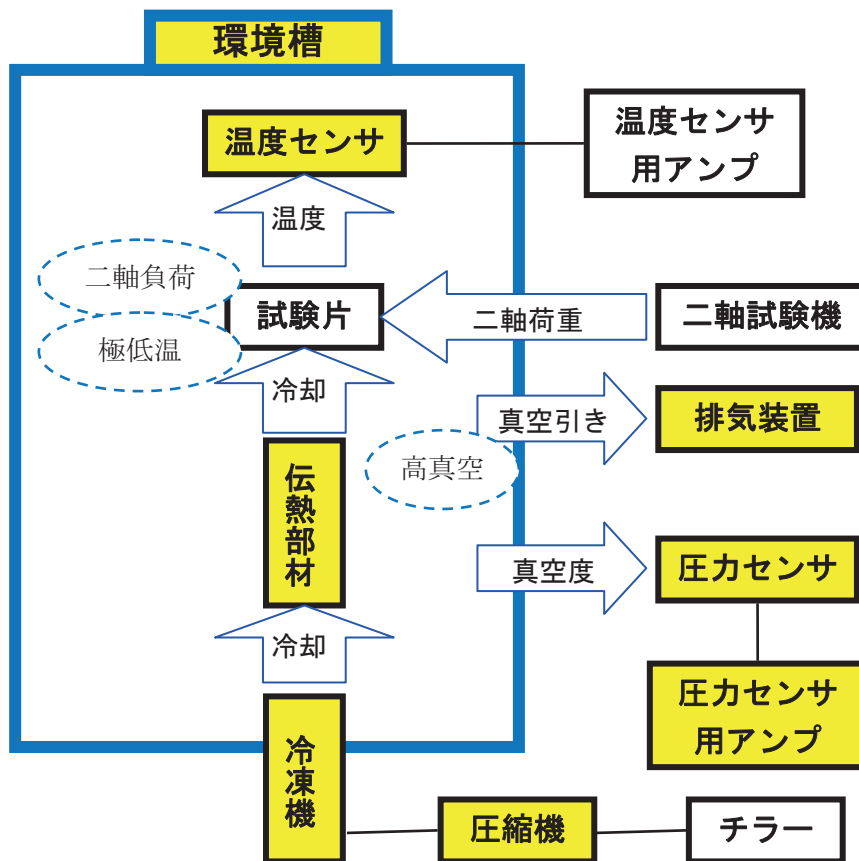


図 3.1 極低温環境槽概要 (黄色い枠が今回開発した部分)

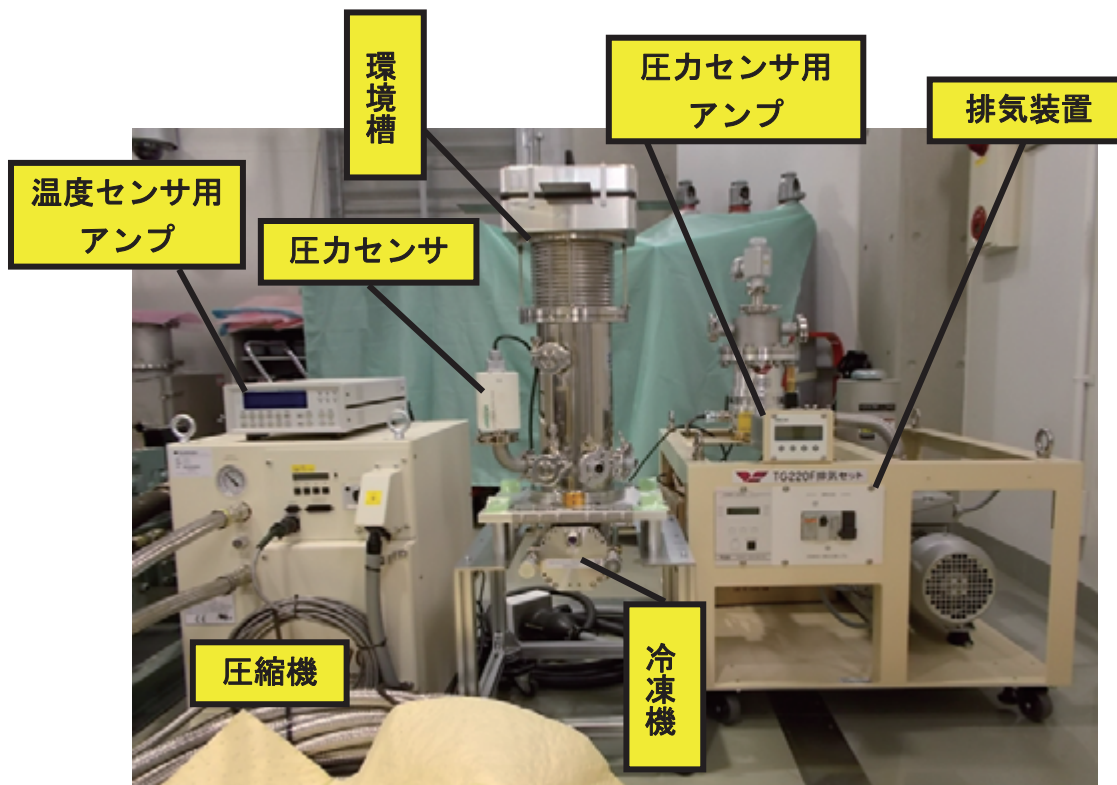


図 3.2 極低温環境槽構成品 (伝熱部材、温度センサを除く)

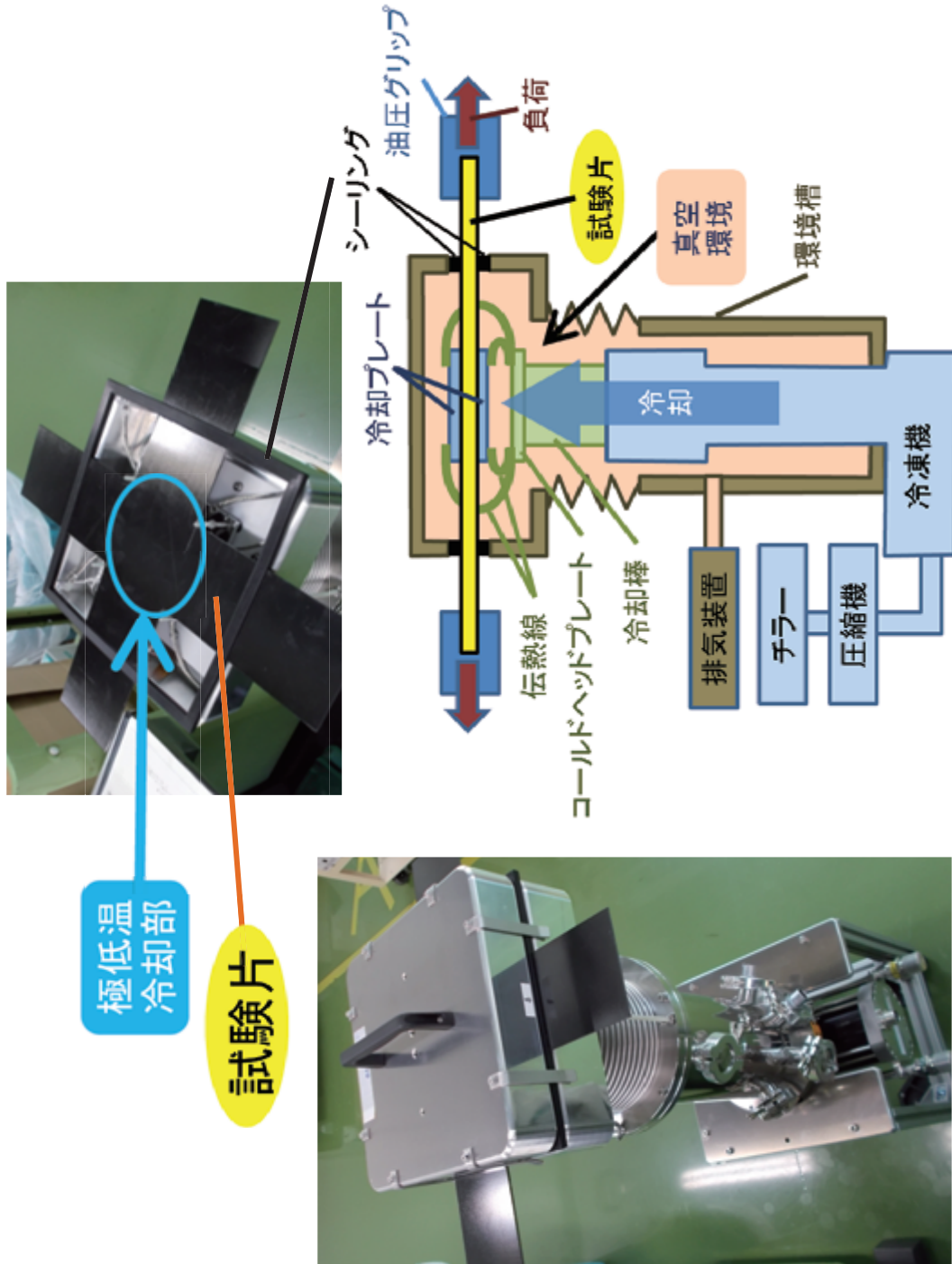


図 3.3 試験片の冷却と負荷の概要

表 3.1 極低温環境槽/二軸試験機の諸元

冷却	
冷却方式	冷凍機式(ギフォード・マクマホン方式)
冷凍機	住友重機械工業製冷凍機 SRDK-500B
圧縮機	住友重機械工業製圧縮機 F-70
圧縮機用チラー	オリオン製チラー RKE3750A-V
試験温度*1	-243°C (30K)以下
冷凍能力	40W at -253°C (20K)
負荷	
負荷装置	二軸疲労試験機
負荷軸数	二軸
負荷能力	±245kN (±25 ton)
負荷変位量	±50mm
真空排気	
低真空排気装置	アルバック社製ロータリーポンプ VD301
高真空排気装置	大阪真空機器製作所製ターボ分子ポンプ TG220F
試験時圧力	1Pa 以下
圧力測定	
圧力センサ	アネルバ社製コールドカソードピラニゲージ M-360CP-SP
測定範囲	$5 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^5$ Pa
圧力センサ用アン プ	アネルバ製アンプ M-601GC
温度測定	
温度センサ	LakeShore 社製シリコンダイオード温度センサ DT-670A-CU
測定範囲	1.4K~500K
温度センサ用アン プ	Lakeshore 社製温度コントローラ Model 331

*1) CFRP 試験片板厚 2mm、腕幅 80mm の十字試験片の場合

3.2 環境槽

環境槽を図 3.4 に示す。環境槽は、冷凍機が組み込まれている環境槽下部と、環境槽下部の上に設置され試験片が取り付けられる角形容器から成る。角形容器は、さらに試験片の上側と下側の角形容器上部と角形容器下部に分けられる。角形容器と環境槽下部それぞれの写真をそれぞれ図 3.5(a) と (b) に示す。環境槽は、二軸試験機の下に設置されている環境槽支持台(図 3.6)の上に取り付けられ、二軸試験機中央部に設置される。

環境槽下部に組み込まれた冷凍機の極低温部には、試験片が設置される位置まで伸びるアルミ合金製の冷却棒(図 3.7)が取り付けられており、冷却棒にはコールドヘッドプレート(図 3.8)が取り付けられる。環境槽下部に図 3.9(a)のように角形容器下部に設置した後に、図 3.9(b)のようにコールドヘッドプレートを冷却棒に取り付け、コールドヘッドプレートに伝熱線を取り付ける。伝熱線は、試験片に取り付けた冷却プレートとコールドヘッドプレートを熱的に接続し、冷却プレートと冷凍機極低温部は熱的に接続される。

角形容器に取り付けられた十字型試験片の 4 つの腕の端部は図 3.5(a)に示すように角形容器の外に露出し、試験機の油圧グリップでチャックすることを可能としている。外部に露出した試験片の端部は大気圧環境にあるが、2章で示したように十字型試験片の評定部を囲み、角形容器に合わせた形状の四角いシーリングを試験片に追加工し、角形容器の上部と下部でそのシーリングを挟み込むことにより、試験片評定部がある角形容器内部は、高真空に保つことが可能となる。極低温冷却のための断熱のために、試験片評定部周辺を高真空に保つ必要がある。シーリングを追加工した試験片の写真とシーリングの寸法をそれぞれ図 3.10 と図 3.11 に示す。

試験片に取り付けたシーリングを上下から角形容器で押さえつけた場合、引張負荷時の十字型試験片腕部の伸びに伴い、シーリングと角形容器の間に摩擦により負荷荷重の一部が角形容器に伝達されてしまう。この摩擦を抑えるために、図 3.10 に示す部分に、真空グリスを塗布し、角形容器への荷重伝達を抑える。ただし、真空グリスを角形シーリングすべてに塗布すると、角形シーリングの角部が、環境槽内を真空引きした際の環境槽内外の差圧により、環境槽内に滑り込み、断熱のための真空環境が破られるため、真空グリスの塗布領域は、図 3.10 に示す部分にのみすることに注意する。

このような角形シーリングにより、断熱のための環境槽内の高真空の実現と、第 2 章で検討した試験片の破壊に伴う環境槽の損傷を避けることができる。冷凍機と試験片評定部は、伝熱部材で接続されているため、図 2.5 に示すような破壊が生じた場合、評定部に接続していた伝熱部材が引っ張られ、伝熱部材が接続されている冷凍機への負荷により冷凍機が損傷する恐れがある。そのような冷凍機の損傷を避けるため、冷却プレートとコールドヘッドプレートを熱的につなぐ伝熱線は十分な長さを持たせ、試験片評定部が破壊に伴い大きく移動した場合でも、伝熱線から冷凍機側には荷重が伝わらないようにしている。

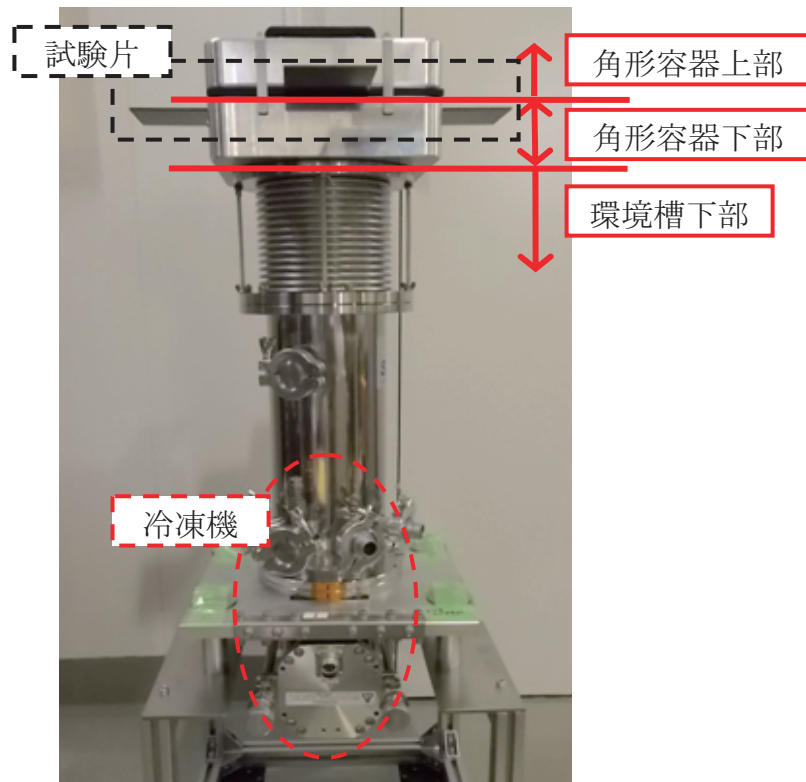
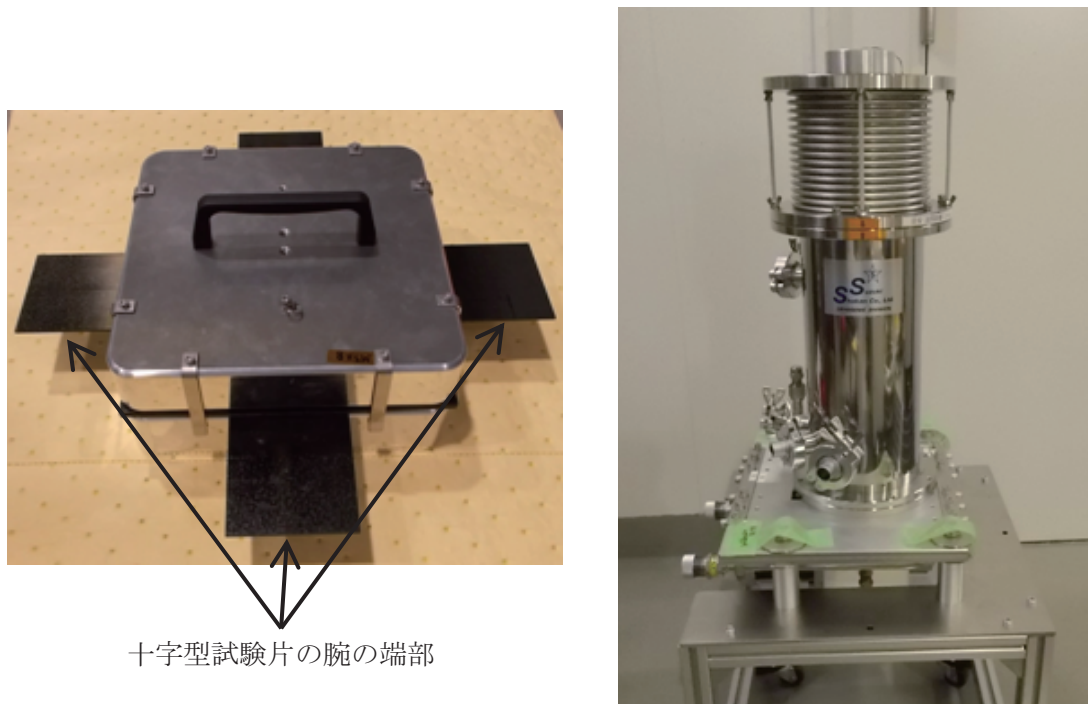


図 3.4 環境槽



(a) 角形容器

(b) 環境槽下部

図 3.5 極低温環境槽の角形容器および環境槽下部

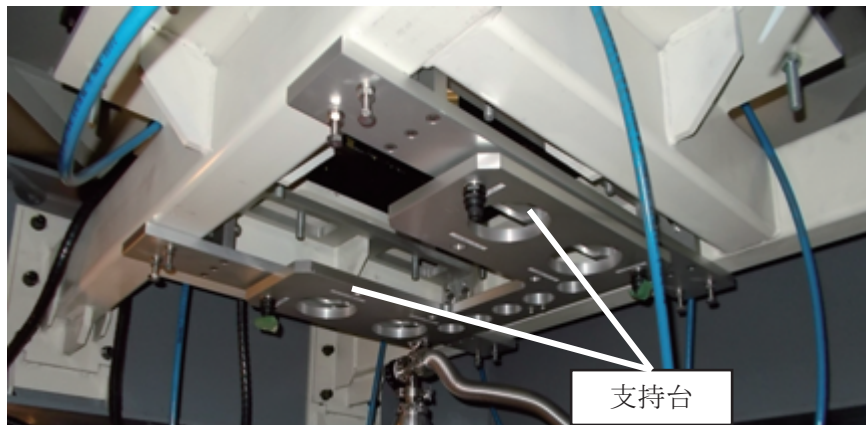


図 3.6 二軸試験機下部のピットから見た環境槽支持台

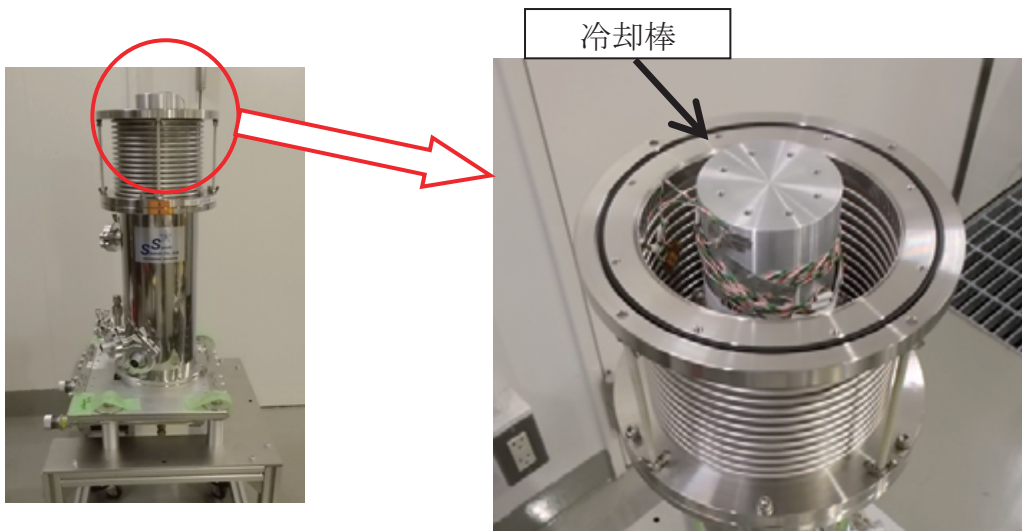


図 3.7 冷凍機極低温部に接続されている冷却棒

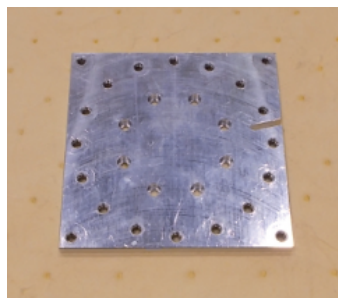
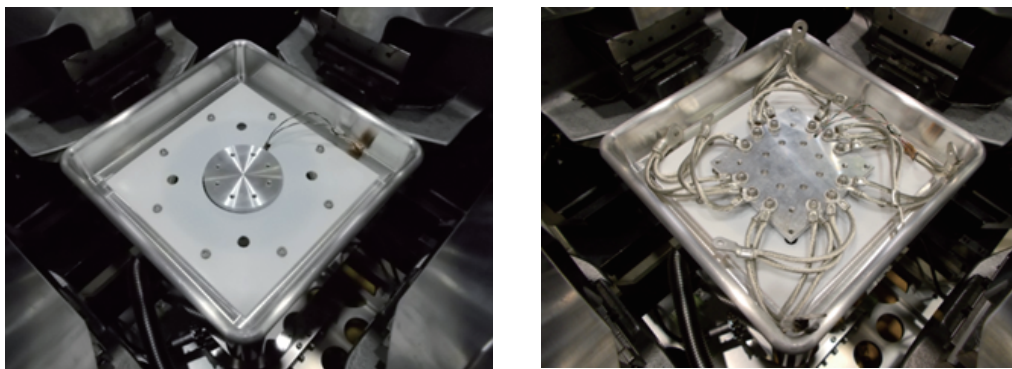


図 3.8 コールドヘッドプレート



(a) 環境槽下部に設置した角形容器下部 (b) 冷却棒に設置したコールドヘッドプレート
図 3.9 環境槽下部に設置した角形容器下部とコールドヘッドプレート

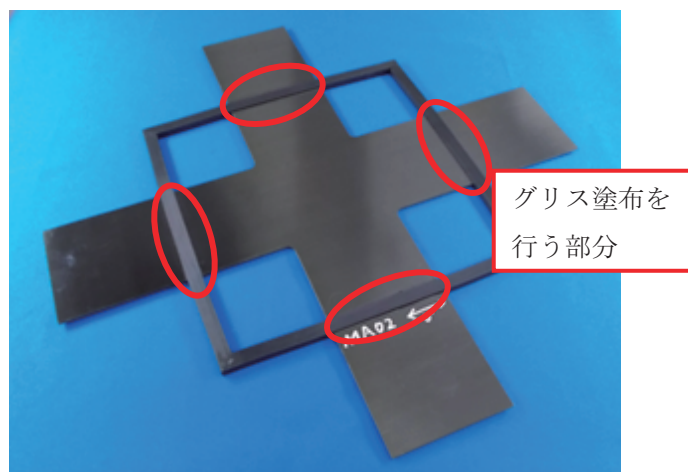


図 3.10 シーリングを追加した十字型試験片

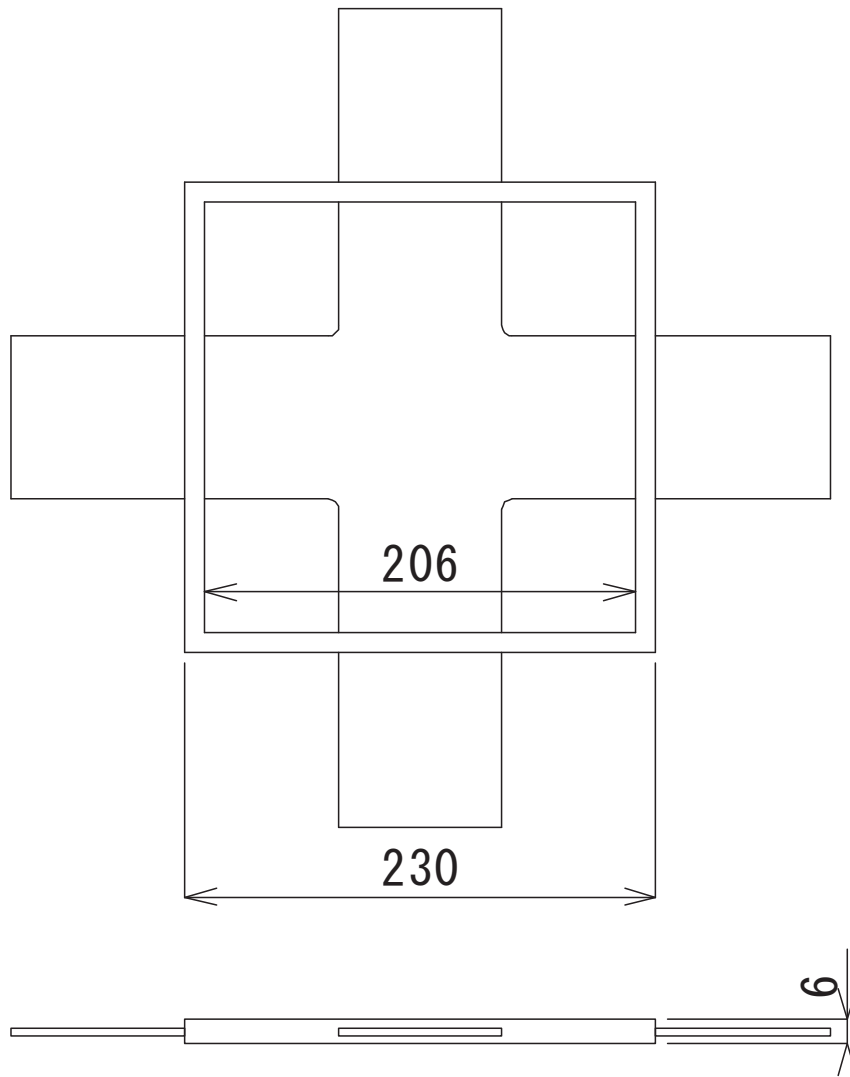


図 3.11 シーリングの寸法(単位：mm)

3.3 冷凍機/圧縮機

極低温環境槽システムでは、試験片の冷却に住友重機械工業製冷凍機 SRDK-500B および圧縮機 F-70 を用いる。冷凍機および圧縮機の写真を図 3.12 および図 3.13 に示す。冷凍機 SRDK-500B /圧縮機 F-70 の冷凍能力は -253°C (20K) において 40Watt である。圧縮機 F-70 の冷却はオリオン製チラー RKE3750A-V (図 3.14) を用いて行う。図 3.12 に示す冷凍機上部のコールドヘッドが極低温となる部分である。冷凍機と圧縮機の間は、冷凍機の駆動電力のためのエキスパンダケーブルと、ヘリウムを冷凍機に循環させるための 2 本のフレキシブルケーブルで接続される。チラーの冷却水温度と流量は圧縮機の要求範囲(冷却水温度: 5°C ~ 25°C 、流量:6~9L/min)に調整にする必要がある。

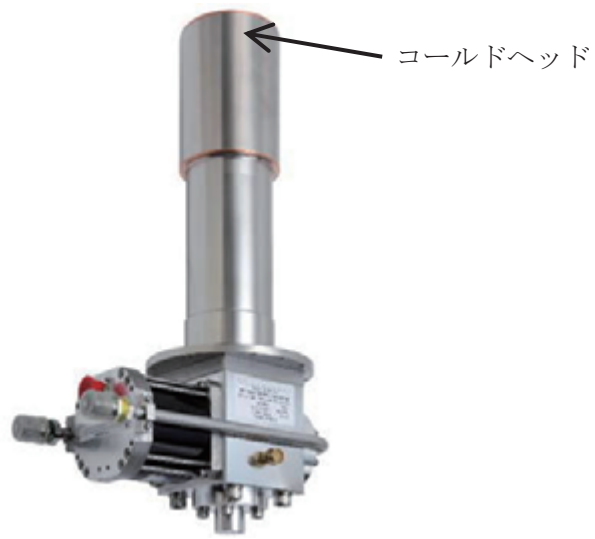


図 3.12 冷凍機

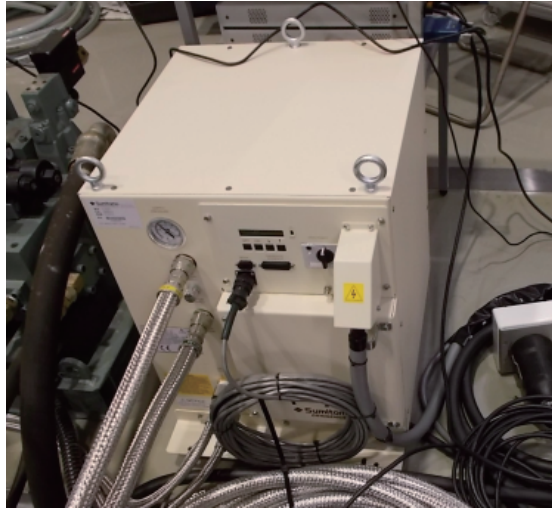


図 3.13 圧縮機



図 3.14 チラー

3.4 排気装置

対流や空気の伝熱による試験片評定部への熱の流入を防ぐために、環境槽内を高真空に保つ必要がある。環境槽内を高真空に保つための排気装置を図 3.15 に示す。排気装置は、低真空排気装置としてのアルバック社製ロータリーポンプ VD301 と、高真空排気装置としての大阪真空機器製作所製ターボ分子ポンプ TG220F から構成されている。環境槽内の排気を行う場合、大気圧から低真空ではロータリーポンプで排気し、低真空から高真空までの排気をターボ分子ポンプで行う。

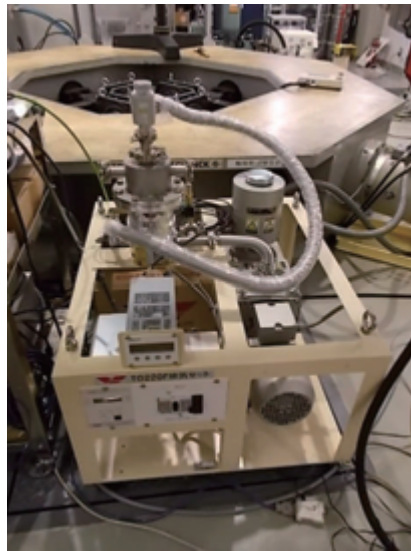


図 3.15 排気装置

3.5 圧力センサおよび温度センサ

極低温環境槽には、環境槽内部の圧力を測定するための圧力センサを用いている。また、試験片評定部の温度を測定するために、冷却プレートへ温度センサを取り付けている。

環境槽内の圧力を測定するための圧力センサは、アネルバ社製コールドカソードピラニゲージ M-360CP-SP (圧力測定範囲： $5 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^5$ Pa) を用いている(図 3.16)。圧力センサは、環境槽のポートに取り付けられており、センサ出力は排気装置に取り付けられているアネルバ製アンプ M-601GC (図 3.17) にセンサ出力を接続して、圧力をモニタする。

試験片に取り付けた冷却プレートの温度を測定するために、上下の冷却プレートそれぞれに 1 つずつ温度センサを取り付けている。温度センサは、自己発熱が小さいシリコンダイオード温度センサ (LakeShore 社製 DT-670A-CU) を使用した。温度センサの外観を図 3.18 に示す。シリコンダイオード温度センサは、図 3.19 に示す Lakeshore 社製温度コントローラ (Model 331) に接続し、温度をモニタする。シリコンダイオードセンサは、図 3.20 のように M2.5 のねじにて冷却プレートに取り付けられる。



図 3.16 圧力センサ

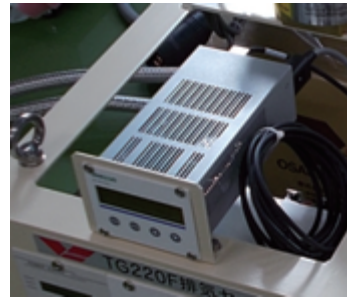


図 3.17 圧力アンプ

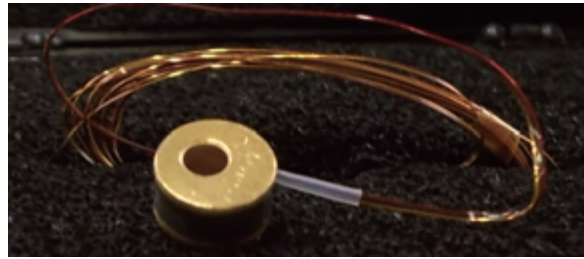


図 3.18 温度センサ



図 3.19 温度センサアンプ

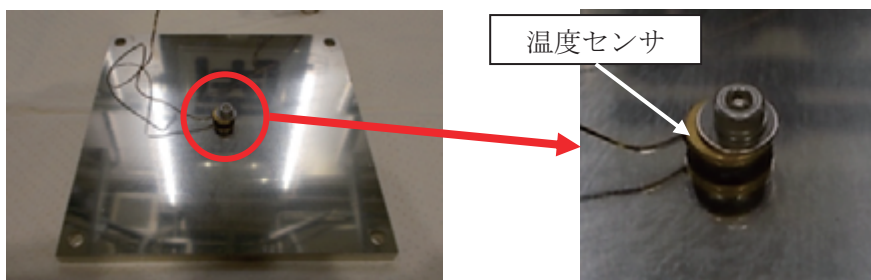


図 3.20 銅製冷却プレートに取り付けた温度センサ

4 二軸試験機

極低温環境槽に設置された試験片の両端部は、環境槽外部に露出しており、その試験片両端部を直接つかみ、二軸試験機を用いて負荷を加える。二軸試験機は、4台のアクチュエータ(容量：±245kN)、試験フレーム、油圧源、および制御装置から構成される。二軸試験機の写真を図4.1に示す。二軸試験機の4台のアクチュエータは、向かい合わせに配置された2台1組が1つの負荷軸となり、2組の負荷軸は直交するように配置されている。アクチュエータ番号1番と2番からなる軸をX軸、アクチュエータ番号3番と4番からなる軸をY軸としている。二軸試験に供する試験片は十字型をしており、それぞれのアクチュエータに設置された油圧グリップに十字型試験片の4つの腕部をチャックし、試験片中央部に二軸負荷を加える。各軸の荷重値、X軸とY軸の荷重比率は任意に設定することができる。

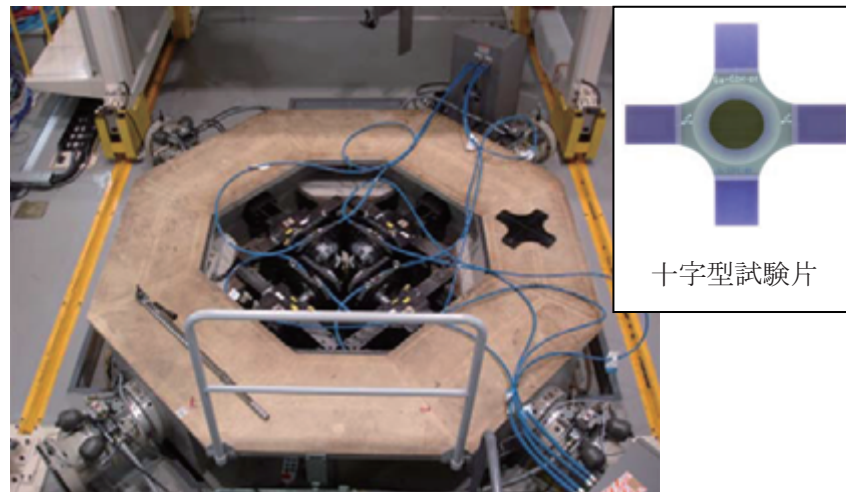


図 4.1 二軸疲労試験機

5 試験手順

本章において、試験手順の説明を行う。極低温環境槽を用いた試験手順は複雑となるため、作業ミスを防ぐための作業チェックリストを作成した。作業チェックリストを表5.1に示す。

5.1 環境槽下部の設置

クレーンで環境槽下部を吊り下げるために、図5.1に示すように環境槽下部にM5のアイボルトを4本取り付けます。環境槽下部を試験片に設置するときには、圧力センサや排気バルブと油圧グリップ等への接触および破損を避けるため、クレーンで吊り下げる前に環境槽下部から圧力センサや排気バルブが取り外されていることを確認する。もし、取り外されていない場合は圧力センサや排気バルブを環境槽下部から取り外す。環境槽下部に取り付けたアイボルトに吊り具を接続し、図5.2のようにクレーンで吊り下げる。

二軸試験機の4つのアクチュエータを変位-45mm程度となるように動かし、二軸試験機中央部に環境槽

下部を降ろす。このとき、冷凍機のコネクタを 2 番アクチュエータの方向に向けて降ろす。図 5.3 のように支持台に環境槽下部をのせ、位置決め穴に固定した後、吊り具とアイボルトを環境槽下部から取り外す(図 5.4)。

図 5.5 と図 5.6 のように圧縮機と冷凍機の間をヘリウムサプライ用フレキシブルチューブ、ヘリウムリターン用フレキシブルチューブ、モーターケーブルで接続する。

図 5.7 のように環境槽下部の下方の NW25 ポートに圧力センサを取り付ける。環境槽内の排気を行うため、環境槽下部に排気バルブとフレキシブルチューブを図 5.8 のように取り付け、フレキシブルチューブを排気装置に接続する。温度等を測定するための 2 本の測定用ケーブルを図 5.9 のように接続する。

ベローズ部品(図 5.10)を M5x20 のねじを用いて、環境槽下部に取り付ける。ベローズ部品は O リング用溝がある側を上にして、その溝に O リングを取り付ける。4 本の GFRP ねじがアクチュエータの軸上に位置するようにし、図 11 のように環境槽下部のフランジの矢印マークとベローズ部品のフランジの矢印マークを合わせ、ベローズ部品を取り付ける(図 5.12)。ベローズ部品を取り付ける前に、環境槽下部の O リングの溝に O リングがはまっていることを確認する。

表 5.1 作業チェックリスト

確認欄	作業名	対応章	完了時間	備考
1	二軸試験機中央に環境槽下部を設置する。	5.1章 環境槽 下部の設置	:	
2	圧縮機と冷凍機間の接続を行う。			
3	圧力センサ、測定用ケーブル、排気装置を環境槽下部に接続する。			
4	ベローズ部品を環境槽下部に取り付ける。			
5	角形容器下部(テフロン板も含む)をベローズ部品に取り付ける。	5.2章 角形容器の 設置	:	
6	コールドヘッドプレートをコールドヘッドに取り付ける。			
7	コールドヘッドプレートに伝熱線を取り付ける。			
8	コールドヘッドプレートにPEEK全ねじを取り付ける。			
9	下側冷却板に温度センサを取り付ける			
10	ワッシャと下側冷却板用の伝熱線の端部を蝶ねじを付けたPEEK全ねじに通す。			
11	下側冷却板を伝熱線に接触するようにPEEK全ねじに設置する。			
12	下側冷却板に取り付けた温度センサのコネクタを接続し、温度センサアンプで温度測定ができていないか確認する。			
13	十字型試験片に追加したシーリングを有機溶剤でクリーニング後、試験片とシーリングが交差している部分にグリスを塗る。	5.2章 試験片 取り付け	:	
14	ベローズ部品のGFRPねじを用いて角形容器下部を、油圧グリップによる十字型試験片取付高さより下げる。			
15	下側冷却板に取り付けたPEEKねじを油圧グリップによる十字型試験片取付高さより下げる。			
16	十字型試験片を油圧グリップでチャックする。			
17	GFRPねじとGFRPねじについている蝶ねじを用いて角形容器を上昇させ、十字型試験片の角形シーリングと密着するようにする。			
18	下側冷却板に取り付けたPEEKねじをマイナスドライバにより上側冷却板や伝熱線を取り付けられる高さまで上げる。			
19	下側冷却板側の蝶ねじを回し、下冷却板を十字型試験片に密着させる。			
20	上側冷却板をPEEKねじを通して試験片の上に置き、伝熱線、ワッシャ、蝶ねじの順でPEEKねじに通し、蝶ねじを締め付ける。			
21	上側冷却板に温度センサを取り付ける。			
22	角形容器上部にL字型のガイド部品を取り付け、十字型試験片の上側から角形容器上部をかぶせる。			
23	上下の温度センサが正常に動いているか確認する。	5.3章 冷却	:	
24	環境槽と排気装置の間のバルブを閉じ、ロータリーポンプを起動し、ロータリーポンプと環境槽のバルブを徐々に開く。			
25	環境槽内の圧力が約20Pa以下となったら、ターボ分子ポンプを起動し、回転数が48000rpmになることを確認する。			
26	チラーを起動し、冷却水温度:5℃~25℃、流量:6~9L/minであることを確認する。			
27	圧縮機のブレーカがONになっていることと、ヘリウムの圧力が15.0~15.5barであることを確認する。			
28	環境槽内の真空度が約2Paとなったことを確認し、冷凍機の電源を入れ、冷却を開始する。			
29	温度が150K以下となったら、ターボ分子ポンプと環境槽の間のバルブを閉め、ターボ分子ポンプを停止する。			
30	冷却温度が定常状態となり、冷却が完了したことを確認する。	5.4章 負荷試験と 試験片取り 外し	:	
31	冷却が完了したら、角型容器上部のガイド部品を外し、角型容器上部に落下防止ワイヤーを接続する。			
32	試験片への負荷を実施する。			
33	負荷試験完了後、コンプレッサの電源をオフにし、油圧グリップを開いて試験機と試験片の結合を解放する。			
34	環境槽内部に霜がつかない程度の温度となるまで放置する。			
35	環境槽内を大気解放し、試験片を取り外す。			



図 5.1 環境槽下部へのアイボルトの取り付け

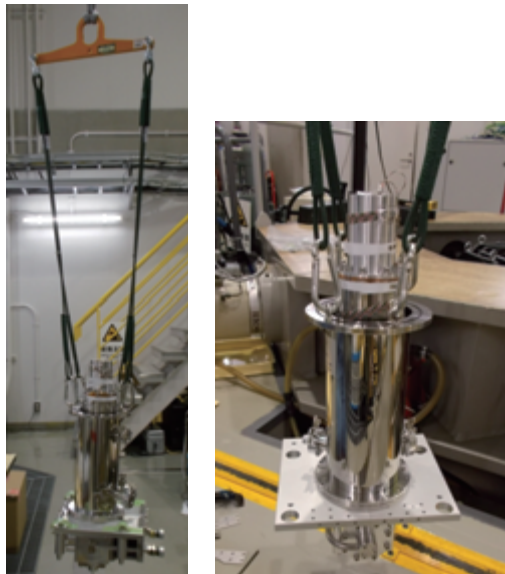


図 5.2 吊り具を用いた環境槽下部の吊り下げ

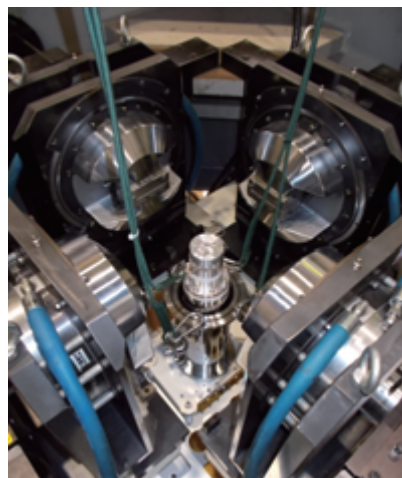


図 5.3 支持台におろされた環境槽下部

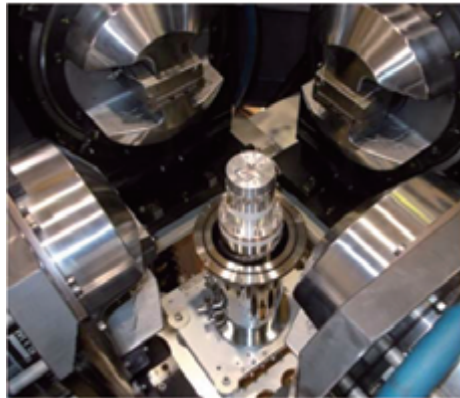


図 5.4 吊り具とアイボルトを取り外した環境槽下部



図 5.5 圧縮機に接続されたフレキシブルチューブとモーターケーブル

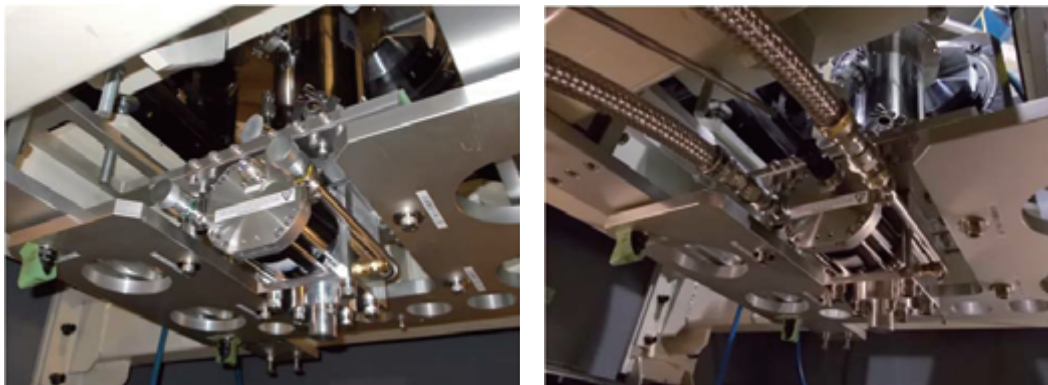


図 5.6 冷凍機に接続されたフレキシブルチューブとモーターケーブル(左：接続前、右：接続後)

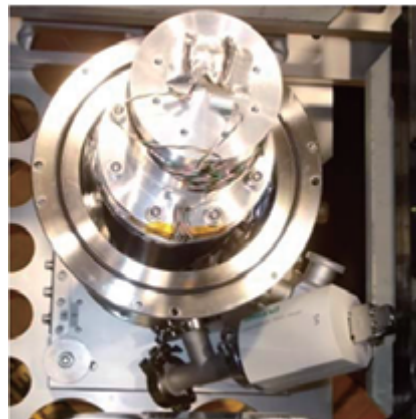


図 5.7 環境槽下部に取り付けた圧力センサ

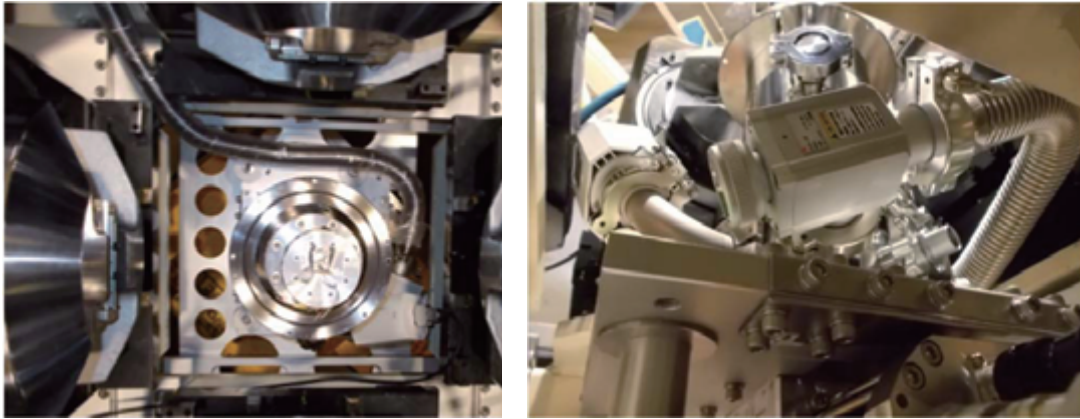


図 5.8 フレキシブルチューブと排気バルブの接続

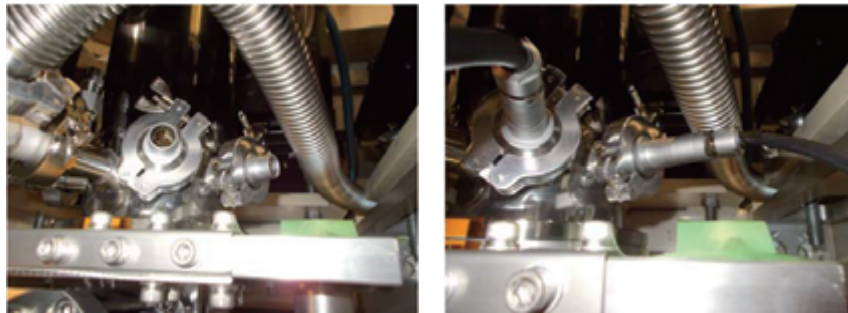


図 5.9 環境槽下部への測定用ケーブル(2本)の接続(左:接続前、右:接続後)

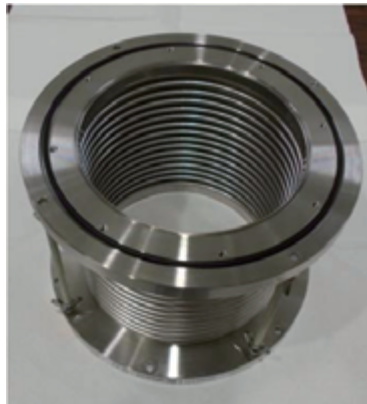


図 5.10 ベローズ



図 5.11 ベローズ部品の矢印マーク

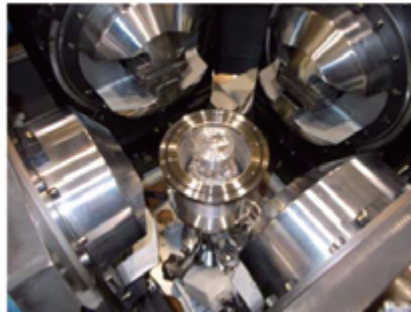


図 5.12 環境槽下部に取り付けたベローズ部品

5.2 角形容器の設置

角型容器下部(図 5.13)を図 5.14 のようにベローズ部品の上に置き M4x20 のねじを手締めで取り付ける。テフロン板(図 5.15)を図 5.16 のように温度センサ配線と中心部スリットの位置を合わせて角型容器下部の上に置く。テフロン板をのせた後、角型容器下部を止めている M4x20 のねじをレンチで締める。環境槽下部の底にレンチを落とす危険があるため、角型容器下部を止めている M4x20 のねじはテフロン板をのせた後に、レンチで締める。

コールドヘッドプレートを M3x6 のねじを用いて図 5.17 のように冷却棒に取り付ける。コールドヘッドプレートも、温度センサ配線とコールドヘッドプレートのスリットの位置を合わせて取り付ける。もし、コールドヘッドプレートに伝熱線がとりついていない場合は、M4x6 のねじを用いて伝熱線を取り付ける。

PEEK 全ねじ M4x50mm(図 5.18)を図 5.19 のようにコールドヘッドプレートの 4 つの角の穴に取り付ける。PEEK 全ねじの上部は、角型容器下部の高さ以下になるようにし、試験片取り付けの邪魔にならないようにする。

図 3.20 のように銅製冷却プレート(図 5.20)の中央に温度計#2(下側用)を M2.5x8 ねじを用いて取り付ける。スプリングワッシャと平ワッシャをいれ、試験片側に M2.5x8 ねじが飛び出さないようにする。

図 5.21 のように PEEK 全ねじに M4 の蝶ねじ、スプリングワッシャ、伝熱線の順にそれぞれを通す。蝶ねじは平坦部を上に向け、伝熱先端部の平面が冷却プレートに密着するようにする。温度センサを取り付けた下側銅製冷却プレートを温度センサが下側になるように設置する(図 5.22)。温度センサのリード線の先端についているコネクタを環境槽側の温度センサ用リード線先端のコネクタと図 5.23 のように矢印が書いてある面を同じ側にして接続する。コネクタ接続後、温度センサアンプで温度が正常に測定できているか確認する。

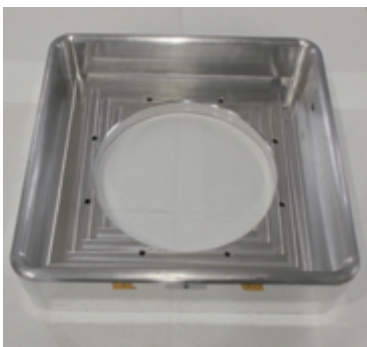


図 5.13 角形容器下部

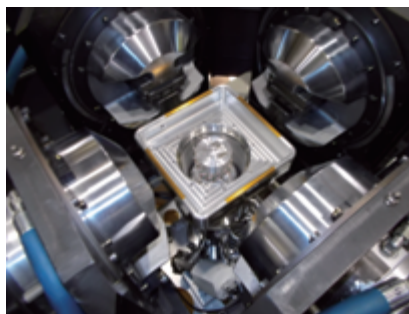


図 5.14 ベローズ部品に取り付けられた角形容器下部

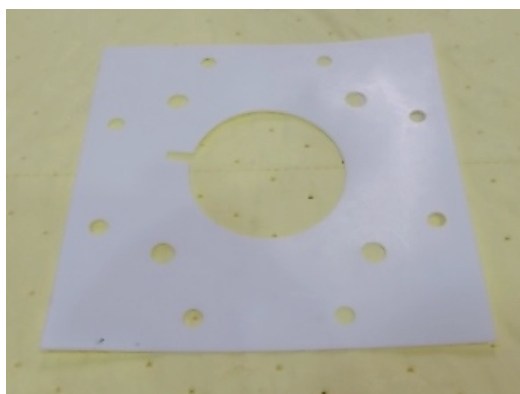


図 5.15 テフロン板

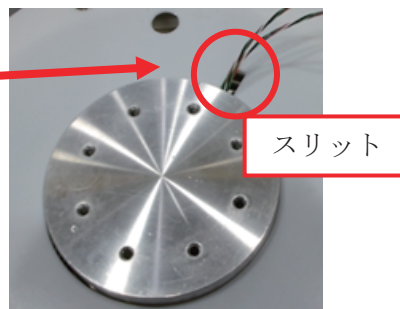
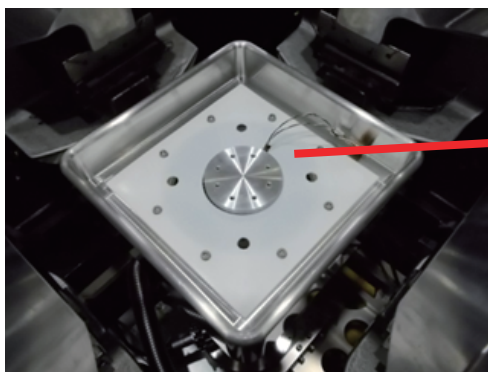


図 5.16 角形容器に置かれたテフロン板

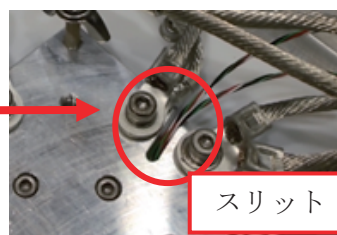


図 5.17 コールドヘッドに取り付けられたコールドヘッドプレート

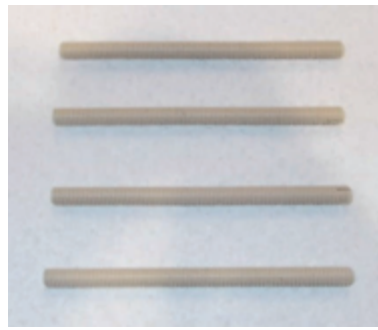


図 5.18 PEEK 全ねじ

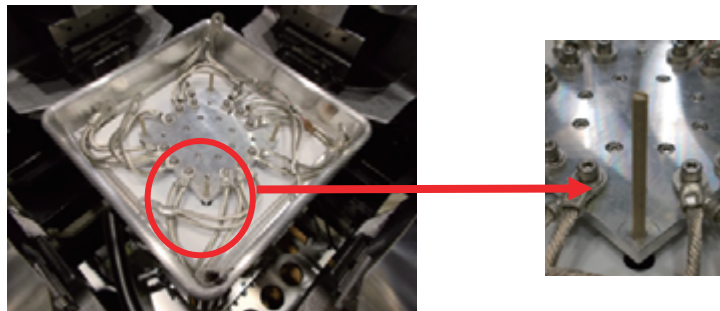


図 5.19 コールドヘッドプレートに取り付けられた PEEK 全ねじ



図 5.20 銅製冷却プレート

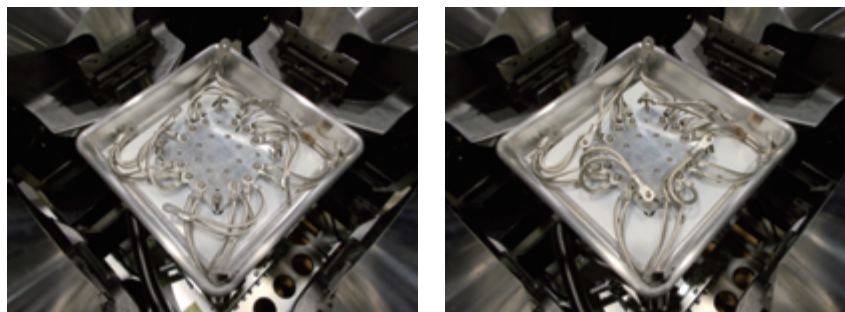


図 5.21 PEEK 全ねじに通した下側用電熱線(左：通す前、右：通した後)

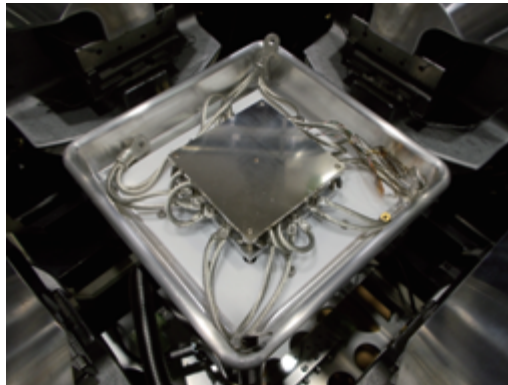


図 5.22 環境槽に設置した下側銅製冷却プレート

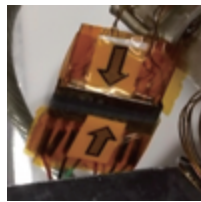


図 5.23 接続した温度センサ用コネクタ

5.3 試験片取り付け

十字型試験片には、あらかじめ角型容器に合わせた四角いシーリングを追加しておく。シーリングは離型剤などが付着している場合があるので、有機溶剤でふき取っておく。負荷時のシーリング部の摩擦対策として、四角いシーリングと試験片が交差する位置の表と裏にグリスを塗布する(図 3.10)。真空グリスは信越化学工業社製高真空シール用オイルコンパウンド HIVAC-G などを用いる。

ベローズ部品の GFRP ねじの上下についている蝶ねじ(図 5.24)をゆるめておき、角形容器下部を上下調節できるようにする。角形容器下部の上端を二軸試験機十字型試験片取り付け高さ以下となるように、GFRP ねじを用いて調整する。角形容器下部を下げたことにより、PEEK ねじ先端と下側銅製冷却プレートが角形容器下部の上端より高くなった場合、PEEK ねじと下側銅製冷却プレートの位置を角形容器下部の上端以下となるように高さを調節する。

油圧グリップ位置を後ろに下げて、十字型試験片を油圧グリップの間に差し込む。その後、試験片をグリップする位置まで油圧グリップを移動させ、試験片の軸を負荷軸に合わせ、十字型試験片を図 5.25 のようにチャックする。図 2.1 に示す試験片寸法の場合、グリップ深さは約 60mm を目安とする。

ベローズ部品の GFRP ねじと蝶ねじを用いて角形容器下部を上へ移動させ、十字型試験片の角型シーリングに密着するようにする。シーリングと角形容器下部に間が空いていないか、薄いプラスチックシート等を間に差し込み確認する(図 5.26)。金属製の隙間ゲージは容器を傷つけるため用いないこと。

図 5.27 のように 4 つの PEEK ねじを、マイナドライバ等を用いて上面の冷却プレートや伝熱線や蝶ねじを取り付ける程度に高くする。

下側の冷却プレート側の蝶ねじを回し、下側の冷却プレートを十字型試験片に密着させる。図 5.28 のように上側の冷却プレートの 4 隅の穴に 4 つの PEEK ねじに通し、上側冷却プレートを十字型試験片の上に置く。冷却プレートの上に伝熱線、スプリングワッシャ、蝶ねじの順に PEEK ねじに通して取り付け、

蝶ねじを締め付ける。

図 5.29 のように上側冷却プレート用温度センサを平ワッシャ、スプリングワッシャ、M2.5x8 ねじを用いて取り付ける。

角型容器上部(図 5.30)にL字型のガイド部品を取り付け、図 5.31 のように十字型試験片の上側から角型容器上部をかぶせ、ふたをする。温度センサが正常に動いているか確認し、もし温度測定に問題がある場合は、角型容器上部を取り外し、温度センサの接続等を確認する。



図 5.24 ベローズ部品の GFRP ねじと蝶ねじ

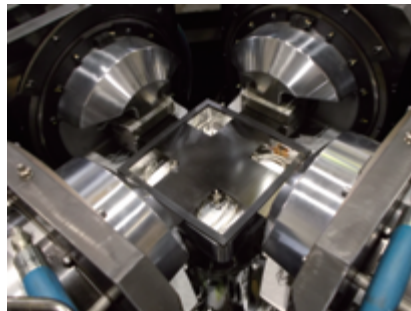


図 5.25 油圧グリップへの試験片の取り付け



図 5.26 角形容器下部とシーリングの間の隙間のチェック

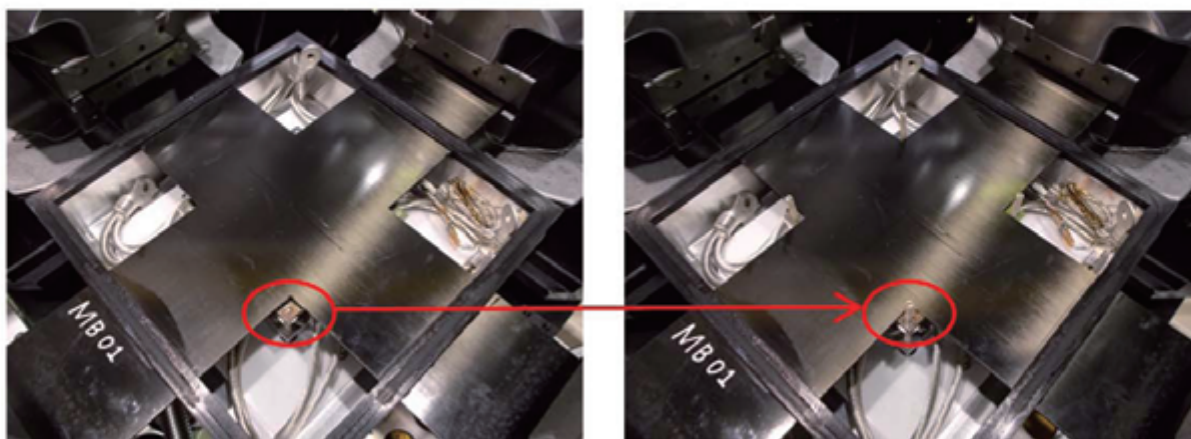


図 5.27 上面側に上げた PEEK 全ねじ(左：上げる前、右：上げた後)

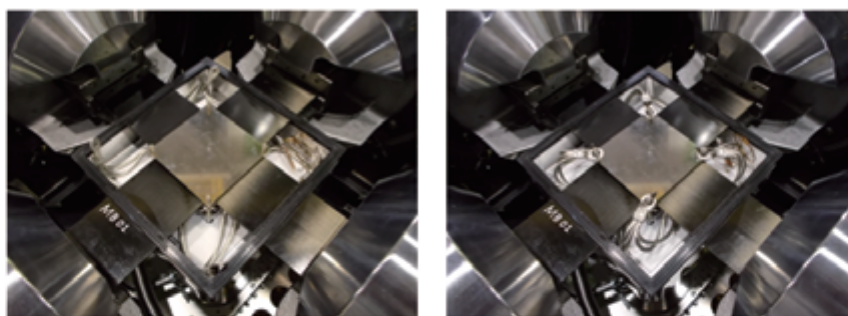


図 5.28 上側冷却プレートの取り付け(左：冷却プレートの設置、右：伝熱線の接続)

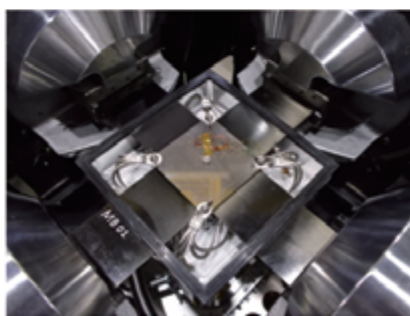


図 5.29 上側冷却プレートに設置した温度センサ

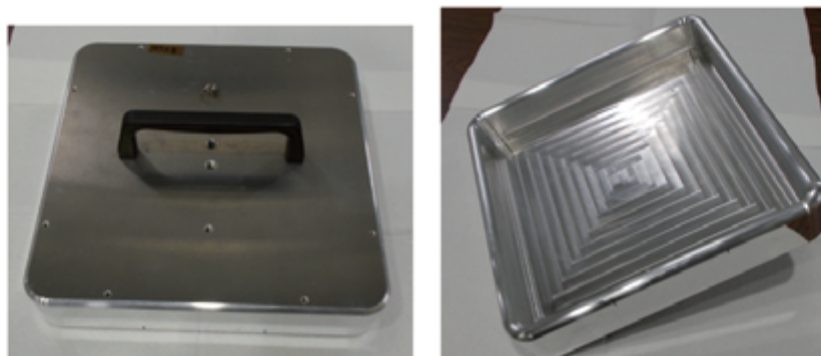


図 5.30 角形容器上部

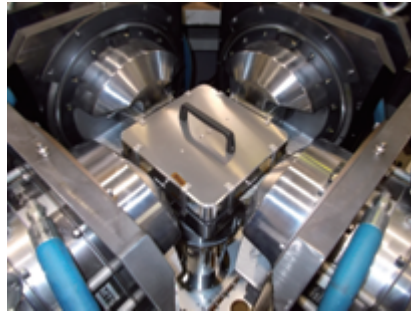


図 5.31 角形容器上部を取り付けた極低温環境槽

5.4 冷却

冷却開始前に、断熱のために環境槽内を高真空にする。まず、環境槽と排気装置(ターボ分子ポンプとロータリーポンプ)の間バルブを閉じる。ロータリーポンプを起動し、その後、ロータリーポンプと環境槽のバルブを徐々に開き、圧力が下がり始めることを確認する。ロータリーポンプにより環境槽内の圧力が約 20Pa 以下になったら、ターボ分子ポンプを起動し、回転数が 48000rpm になることを確認する。

チラー(図 3.14)を起動し、冷却水温度と流量が圧縮機の要求範囲(冷却水温度:5°C~25°C、流量:6~9L/min)であることを確認する。

圧縮機のブレーカ(図 5.32)が ON になっていることと、ヘリウムの圧力が 15.0~15.5bar(1.5MPa~1.55MPa)であることを確認する。

環境槽内の真空度が約 2Pa となったことを確認し、冷凍機用圧縮機の電源を入れ、冷却を開始する。必要に応じて冷却データ等の測定を開始し、温度が 150K 以下(目安:1~2時間程度)になったら、ターボ分子ポンプと環境槽の間バルブを閉め、ターボ分子ポンプを停止する。ターボ分子ポンプが停止後、ロータリーポンプを停止する。さらに、冷却温度が定常状態となり冷却が完了したことを確認する。

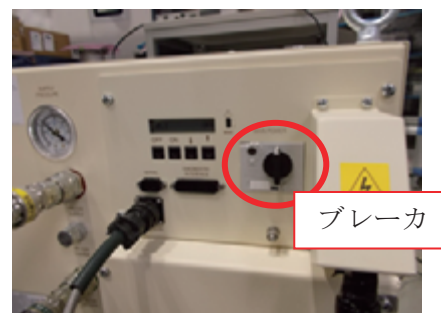
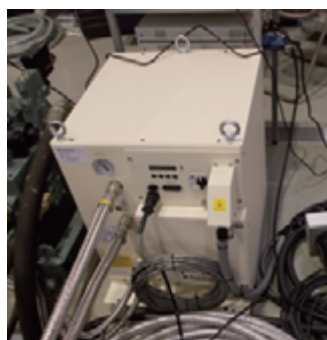


図 5.32 コンプレッサのブレーカ

5.5 負荷試験と試験片取り外し

冷却が完了したら、角型容器上部の L 字型のガイド部品を外す。試験片が破壊した場合に、角型容器上部が跳ね飛ぶ可能性があるため、それを防止する目的で角型容器上部とグリップのアイボルトの間を

ワイヤーで接続する(図 5.33)。破壊まで至らない部分負荷を加える場合は、所定の荷重まで引っ張り、その後に除荷を行う。破壊試験の場合は、破壊するまで負荷を行う。

負荷試験完了後、コンプレッサの電源をオフにし、油圧グリップを開いて試験機と試験片の結合を解放する。そのまま、環境槽内部に霜がつかない程度の温度となるまで半日程度放置する。その後、環境槽内を大気開放し、取り付け手順の逆の順番で、試験片を取り外す。

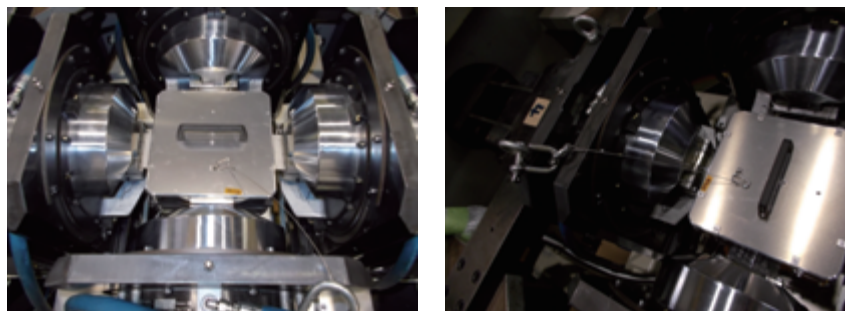


図 5.33 L字金具を外した角形容器上部(左)とワイヤーを接続した角形容器上部(右)

6 性能確認試験

製作された極低温環境槽の性能確認試験を実施した。性能確認試験で得られた冷却性能試験の結果と負荷試験の結果を示す。

6.1 試験片

複合材料の冷却試験および極低温負荷試験を図 2.1 に示す形状の十字型二軸試験片で実施した。板厚は 2mm である。材料は東邦テナックス社製炭素繊維/エポキシ複合材料 HTA/#101 を用いており、積層構成は (0/90)₄₅ である。複合材料試験片は、図 3.10 に示すような角形のシーリングを取り付けている。

6.2 冷却性能

冷却性能の確認では、十字型試験片評定部に取り付けた冷却プレートの温度測定を行った。冷却プレートの厚さと上下の冷却プレートに接続する伝熱線の本数を変えることにより、冷却到達温度を変えることが可能である。板厚 3mm の冷却プレートと 8 本(上側 4 本、下側 4 本)の伝熱線を用いた場合と、板厚 5mm の冷却プレートと 24 本(上側 16 本、下側 8 本)の伝熱線を用いた場合の冷却確認試験を行った。板厚が 3mm の冷却プレートと 8 本の伝熱線を用いた場合の冷却を冷却ケース A、板厚が 5mm の冷却プレートと 24 本の伝熱線を用いた場合の冷却を冷却ケース B と呼ぶこととする(表 6.1)。

ケース A とケース B の場合の冷却性能試験の結果を図 6.1 と図 6.2 に示す。図 6.1 に示すケース A において、最終的に評定部上側が 82.9K、評定部下側が 86.7K に達している。伝熱線の本数が多く、冷却プレートの板厚が厚いケース B では伝熱効率が高いため、図 6.2 に示すようにケース A(図 6.1)より最終到達温度が低く、評定部上側が 27.4K、評定部下側が 25.7K となった。伝熱効率が高いケース B は、最

終的な定常状態に達する時間も短いことも図 6.1 と図 6.2 を比べると分かる。

表 6.1. 冷却ケース

冷却ケース	冷却プレート板厚	伝熱線本数(上側本数, 下側本数)
A	3mm	8本(4本, 4本)
B	5mm	24本(16本, 8本)

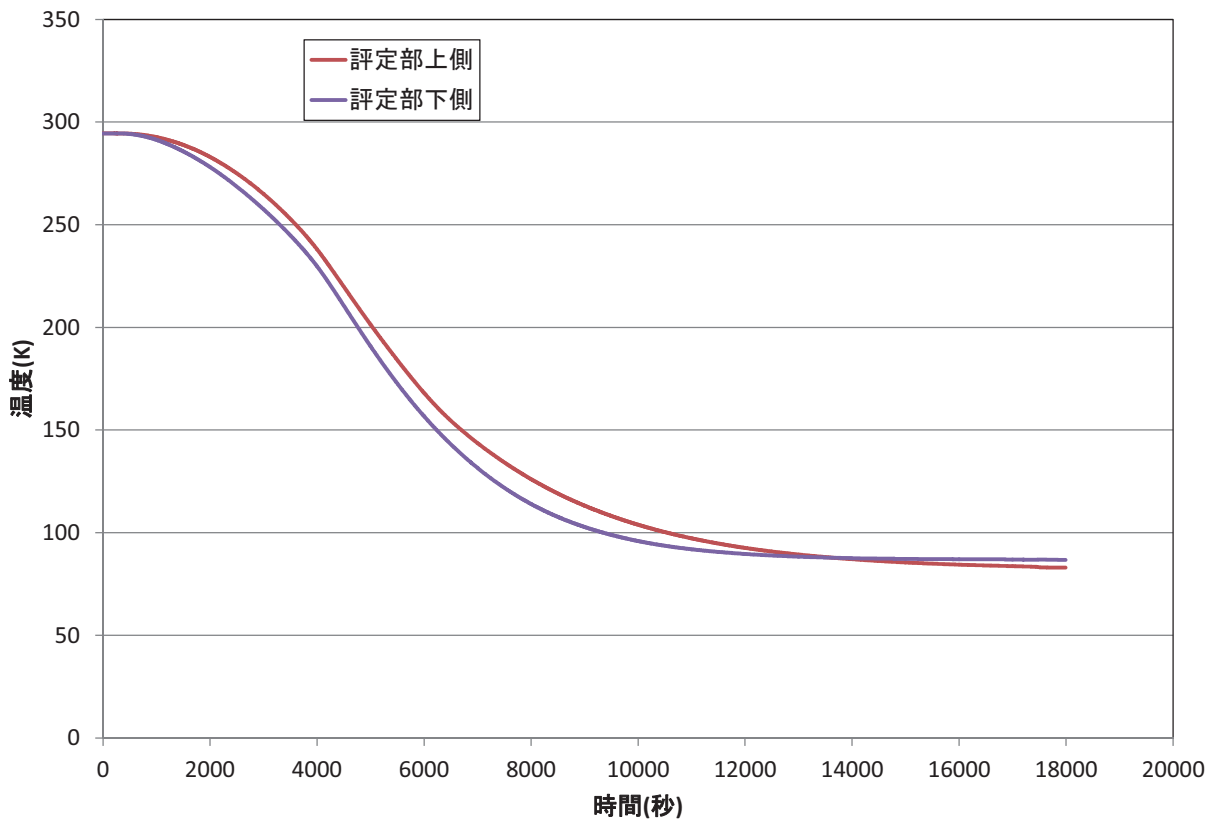


図 6.1 CFRP 試験片冷却性能確認試験結果(ケース A)

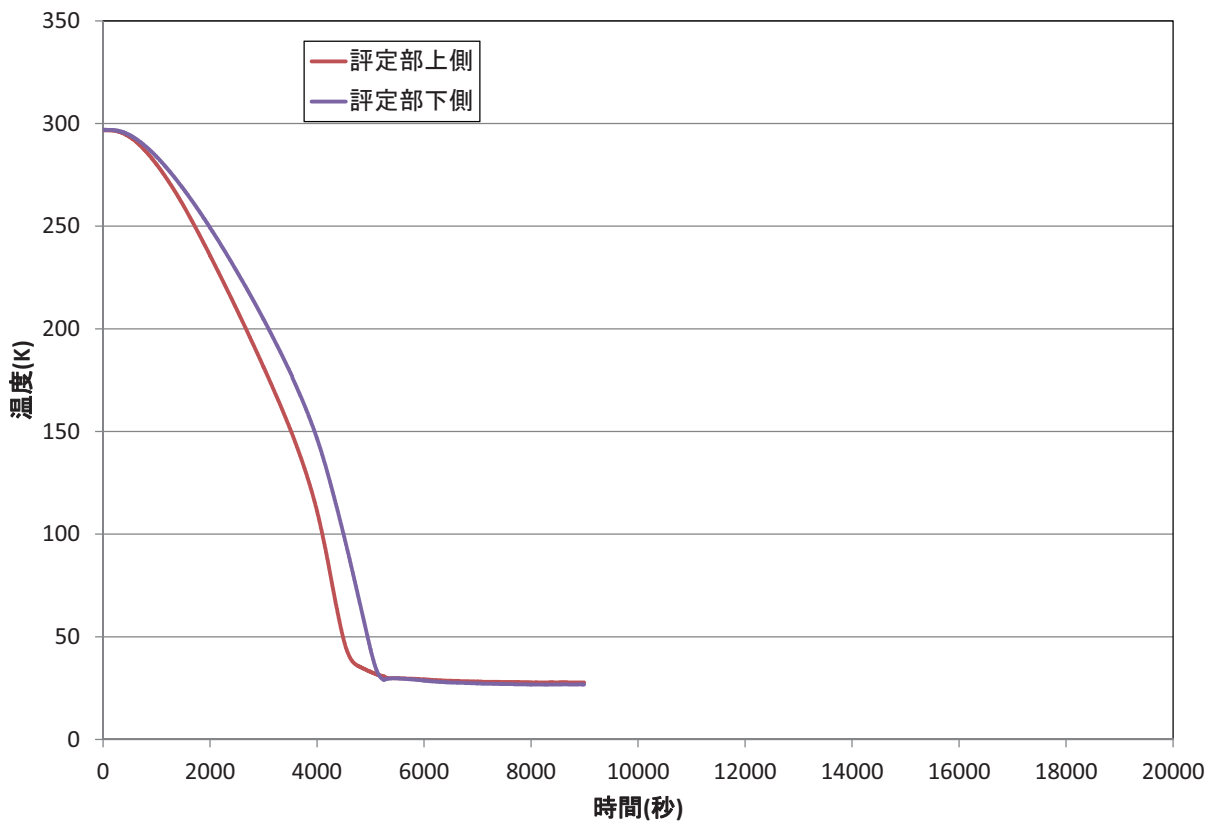


図 6.2 CFRP 試験片冷却性能確認試験結果(ケース B)

6.3 極低温負荷試験

複合材料の二軸極低温負荷試験の結果を図 6.3 に示す。十字型複合材料試験片は、図 6.2 に示す冷却した後、負荷を加えた。負荷は変位制御で行い、負荷速度比率(x 方向負荷速度 : y 方向負荷速度)=1 : 1 に固定して試験を実施した。4 つの各アクチュエータのクロスヘッドスピードは 0.2mm/min である。目標荷重は 15kN であり、目標荷重に達した後、同じクロスヘッドスピードで除荷を行った。負荷および除荷の間、真空は保たれていた。

負荷中の温度変化を図 6.4 に示す。図に示すように負荷中に温度の変化があり、2K から 3K 程度の変化が測定された。この温度変化は、負荷に伴い冷却プレートと試験片の接触状態が変化し、上下の冷却プレートと試験片の間に温度の移動が起こり、温度の変化が起こったと考えられる。今後、冷却部材の熱容量の増加や、伝熱率向上による冷却性能向上を行い、負荷中の温度変化を低減する必要がある。

図 6.3 の負荷試験を完了し、試験片を取り外すため試験片を常温付近にまで自然昇温させた。自然昇温中は、空気の液化や結露を防ぐため、大気開放を行わずに行った。冷凍機を止めてから約 15 時間後に温度が 10°C に到達した後に、試験片の取り外しを行った。

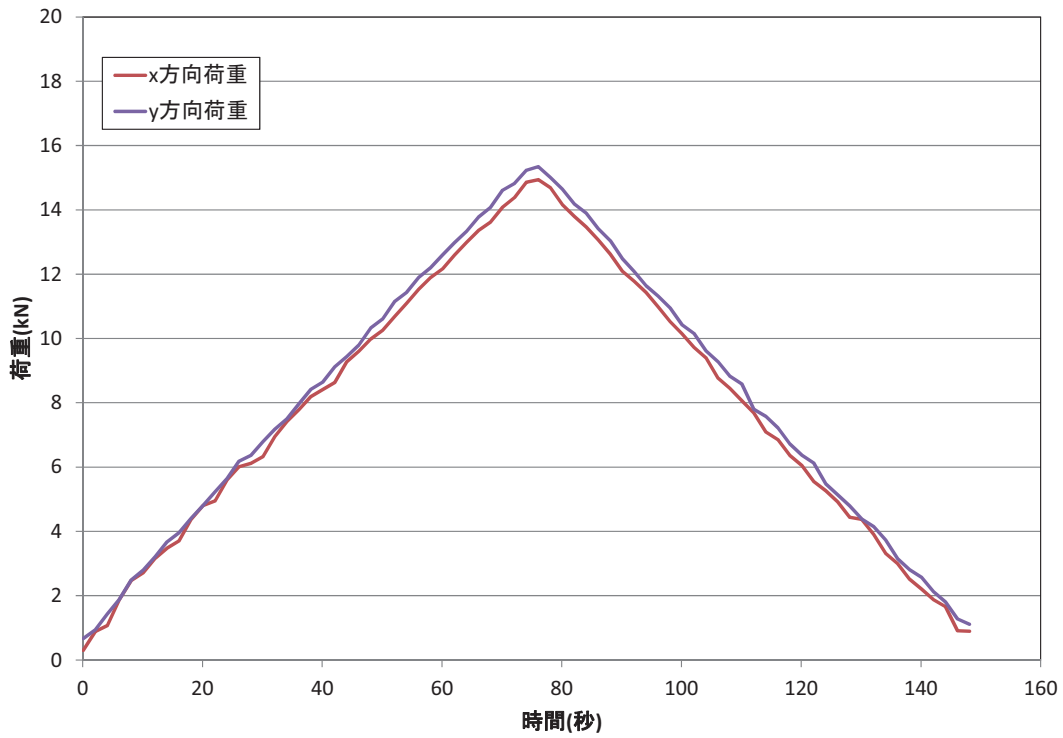


図 6.3 極低温引張試験結果(CFRP 試験片、ケース B)

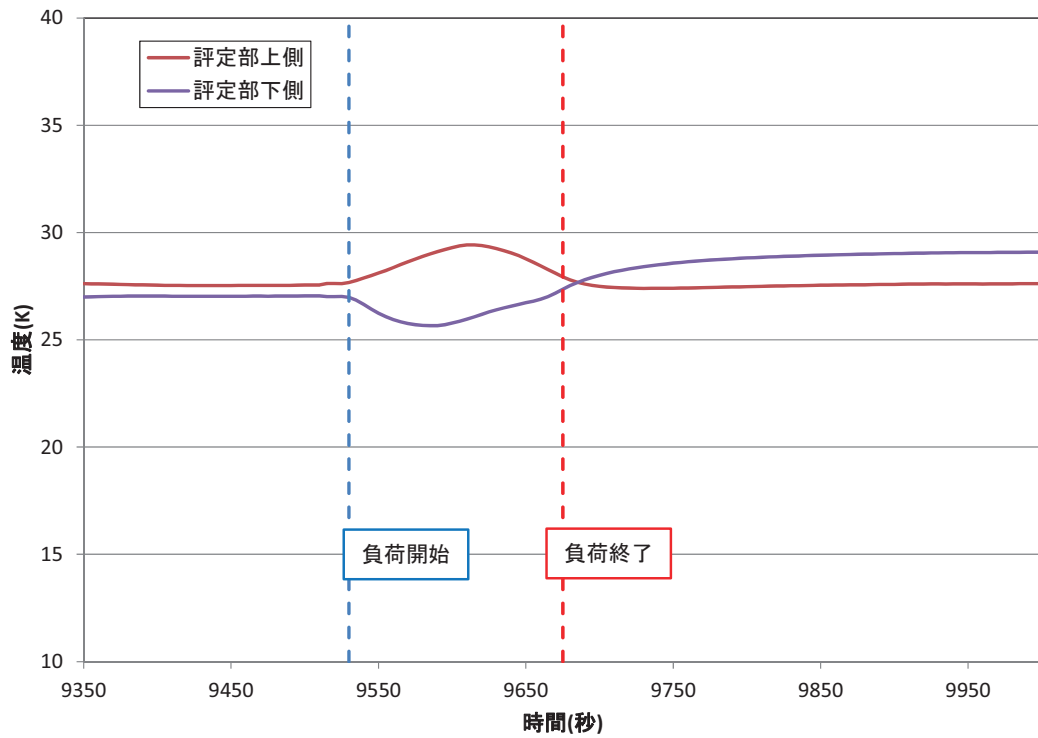


図 6.4 極低温引張り試験中の温度変化(CFRP 試験片、ケース B、負荷中上側温度 27.7K~29.4K、負荷中下側温度 25.7K~27.4K)

7. おわりに

極低温での二軸負荷試験/漏えい試験を行うことを目指し、十字型二軸試験用極低温環境槽の開発を行った。極低温環境二軸力学特性試験を実施するため、試験片の極低温への冷却と二軸負荷を同時に行うという技術課題があった。2章で検討した技術課題と達成状況を表 7.1 に示す。表 7.1 の(a)試験片の極低温への冷却についての課題解決のために、単軸試験用極低温環境槽システムの開発で得られた知見を活用した。

さらに単軸試験用極低温環境槽システムの開発で得られた知見を部分的に活用しつつ、(b)試験片への二軸負荷の課題解決を行った。試験片評定部を高真空に保ちつつ十字型試験片の4つの端部を試験機に力学的に結合する方法を新たに考案し、十字型二軸試験用極低温環境槽を完成させた。試験片評定部を高真空に保ちつつ十字型試験片の4つの端部を試験機に力学的に結合する方法として、十字型試験片自体に評定部を囲むようなシーリングを取り付け、試験評定部を高真空に保つこととした。十字型試験片端部はシーリングの外にあるため、環境槽外に露出している試験片端部を従来の二軸試験と同様にグリップすることができた。また、十字型試験片の破壊が生じて、環境槽に負荷がかからないように試験片に取り付けたシーリングがスライドすることにより、冷凍機を取り付けた環境槽下部の保護を可能とした。

CFRP 十字型試験片を用いた性能確認試験を実施し、30K 以下の冷却性能を確認するとともに、二軸負荷ができることを確認した。

今後は、温度調節システムの追加、温度/ひずみ測定システムの拡充を実施するとともに、表 7.1 の(c)に関するガス漏えい特性システムの開発を行う予定である。

表 7.1 課題と達成状況

課題	技術課題	成果報告
(a) 試験片の極低温への冷却 (目標温度: 液体窒素温度, 77K)	(1) 伝熱線を介して冷凍機と試験片評定部を熱的につなげること	(その1) ³⁾ で報告 (到達温度: 30K)
	(2) 断熱のために冷凍機の極低温部と試験片評定部の周りを高真空に保つこと	
(b) 試験片への二軸負荷	(3) 試験片評定部を高真空に保ちつつ十字型試験片の4つの端部を試験機に力学的に結合すること	本報告(その2)で報告
	(4) 試験片破壊時に、試験片と伝熱線で結ばれた冷凍機と試験片評定部を覆っている環境槽を損傷させないこと	
(c) 試験片のガス漏えい特性の測定	(今後、技術課題の詳細検討を実施予定)	次報にて報告予定

参考文献

- 1) Richard W. Powell, Mary Kae Lockwood and Stephen A. Cook, The Road from the NASA Access-to-Space Study to a Reusable Launch Vehicle, 49th International Astronautical Congress, Melbourne, Australia, IAF-98-V.4.02, Sept 28-Oct 2, 1998.
- 2) Marshall Space Flight Center/NASA, Final Report of the X-33 Liquid Hydrogen Tank Test Investigation Team, May 2000.
- 3) 熊澤寿, 高戸谷健, 極低温環境力学特性用試験設備の開発(その1: 単軸力学特性試験), 宇宙航空研究開発機構研究開発資料, JAXA-RM-13-014, 2013.
- 4) Theodore F. Johnson, David W. Sleight and Robert A. Martin, Structures and design phase I

summary for the NASA composite cryotank technology demonstration project, AIAA 2013-1825, 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2013

- 5) D.A. McCarville, J.C. Guzman, J.L. Weetin, J.R. Jackson, L. Pelham, J. Steensland, M.B. Soden, C.W. Petersen , Manufacturing Overview of a 2.4 Meter (7.9 Foot) Composite Cryotank, SAMPE Journal, Vol.49, No.5, pp.7-13, 2013.
- 6) NASA Game Changing Development Program Office, Composite Cryotank Technologies & Demonstration, FS-2013-07-206-LaRC, July 2013.
- 7) Tobias Schwanekamp, Carina Ludwig, Martin Sippel, Cryogenic Propellant Tank and Feedline Design Studies in the Framework of the CHATT Project, AIAA 2014-2370, 19th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, 2014.
- 8) Martin Sippel, Alexander Kopp, Katalin Sinko, David Mattsson, Advanced Hypersonic Cryo-Tanks Research in CHATT, AIAA 2012-5945, 18th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, 2012.
- 9) M. Sippel, A. Kopp, D. Mattsson, S. Koussios, Advanced Cryo-Tanks Structural Design Investigated in CHATT, Proceedings of the 13th European Conference on spacecraft structures, materials & environmental testing, pp.1-4, 2014
- 10) H. Kumazawa, T. Aoki, I. Susuki, Analysis and Experiment of Gas Leakage through Composite Laminates for Propellant Tanks, AIAA Journal, Vol. 41, No. 10, pp. 2037-2044 (2003)
- 11) H. Kumazawa, T. Aoki, I. Susuki, Influence of stacking sequence on leakage Characteristics through CFRP composite laminates, Composites Science and Technology, Vol. 66, Issue 13, pp. 2107-2115, (2006)

