

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

十字型二軸力学特性試験用極低温環境槽温度調節システム
A temperature control system for a cryogenic environmental chamber
for biaxial mechanical property testing

熊澤 寿
Hisashi KUMAZAWA

2017年9月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目次

概要	1
1 はじめに	2
2 極低温環境槽概要	2
3 温度調節システムの構成および機器の設定	5
3.1 温度調節システムの構成	5
3.2 機器の設定	7
4 操作手順	10
4.1 温度調節手順	10
4.2 温度調節終了手順	10
5 性能確認試験	11
5.1 試験条件	11
5.2 性能確認試験結果	12
6 おわりに	13
参考文献	13

十字型二軸力学特性試験用極低温環境槽温度調節システム*

熊澤 寿^{*1}

A temperature control system for a cryogenic environmental chamber for biaxial mechanical property testing

Hisashi Kumazawa ^{*1}

Abstract

A cryogenic testing system for a biaxial testing machine was developed to evaluate mechanical properties of composite materials under biaxial mechanical and cryogenic thermal loads. Cryogenic tests for composite materials with temperature less than 20K are available by the cryogenic testing system whose cooling system employs with a refrigerator and heat transfer members. However, it was difficult to control the test temperature in a temperature range of more than 20K, because active temperature control system was not equipped in the cryogenic testing system. The cryogenic testing system for a biaxial testing machine has been improved with a newly developed temperature control system with a heater embedded in a heat transfer member to actively control the test temperature. In this report, the active temperature control system for the cryogenic testing system is summarized with components of the temperature control system, setting procedure, operating procedure and temperature control test demonstration. The temperature control test demonstration showed that high temperature stability at cryogenic temperature can be achieved with this temperature control system.

概要

二軸荷重と極低温熱荷重が加わる複合材料の力学的特性を評価するために、二軸試験用極低温試験システムを開発した。冷凍機と伝熱部材を用いた極低温環境槽システムの冷却には、20Kの温度での複合材料の極低温試験も可能である。しかし、能動的な温度調節が可能ではなかったため、20K以上の温度での温度調整が容易ではなかった。今回、伝熱部材中にヒータを埋め込み、温度調整を能動的にできるように温度調節システムの追加し、二軸材料試験機用極低温環境槽システムの改良を行った。本報告では、極低温環境槽システムのための能動的な温度調節システムについて、温度調節システムの構成、設定手順、操作手順、温度調節試験例について報告する。今回追加した温度調節システムにより、極低温における高い温度安定性が達成されることが、温度調節試験例により示された。

* 平成 29 年 7 月 19 日受付 (Received July 19, 2017)

^{*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)

1 はじめに

航空宇宙機構造の軽量化に、複合材料を用いた構造の適用拡大が進められている。航空機の常温構造への複合材料の適用に続き、より過酷な航空機エンジンやロケットの燃焼器の高温環境などでの使用が検討され、ロケット等の極低温推進剤タンクへの複合材の適用の検討も継続的に行われている。1990年代米国において、NASAは再使用型宇宙往還機の無人実験機 X-33 の開発を進めており、機体の軽量化を目的として複合材料製極低温推進剤タンクを採用した¹⁾。この複合材料製極低温推進剤タンクに対しては、液体水素を用いた加圧試験が行われたが、最終的にはタンクの破壊が確認されることとなった。このタンク破壊の原因調査の結果、極低温及び加圧状態において複合材料中に発生した樹脂割れが原因であり、極低温推進剤タンク構造においては、材料強度だけでなく、極低温での樹脂割れに伴う推進剤漏えい特性も重要であることが明らかとなった²⁾。

極低温環境構造への複合材料の適用には、ビルディングブロックアプローチに沿ったクーポンレベルの試験からフルスケール試験までの広い範囲の試験に基づいた開発が必要である。JAXA 航空技術部門では、極低温における小規模実環境負荷試験を実施するために、既存の二軸試験機で用いることのできる極低温環境槽を開発した^{3,4)}。

二軸試験用極低温環境槽は、伝熱部材の増減により試験片評定部の冷却温度を変えることができ、最低温度 20K から 100K 程度に試験温度の変更が可能であった。しかし、20K 付近の温度では安定して冷却できるが、20K より高い温度での冷却温度は、伝熱部材のねじ止め部などの取り付け具合で、定常となる温度が変わり、試験ごとの目的とする温度への調節が容易でないことが問題であった。

そのような伝熱部材の増減による受動的な温度制御での温度調節の不安定性を改善し、安定的な温度調節を行うことを目的とし、ヒータを伝熱部材中に組み込んだ温度調節システムの構築を行った。

本報告では、ヒータを組み込んだ温度調節システムについて、温度調節システムの構成、操作手順、温度調節試験例について報告する。今回組み込んだ温度調節システムにより、伝熱線の取り付け具合に依存せず、安定的に冷却温度設定ができることが実証された。

2 極低温環境槽概要

二軸試験用の極低温環境槽システムは、二軸試験機と組み合わせて、十字型試験片の評定部に極低温環境での二軸負荷を加えることを可能とするシステムである⁴⁾。

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、チラーから構成される。極低温環境槽の概要及び構成品の写真を、それぞれ図 2.1 と図 2.2 に示す。図 2.1 に今回追加した温度調節用のヒータと加熱用ヒータ電源を黄色の枠で示している。また、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と極低温環境槽と二軸試験機の緒元をそれぞれ図 2.3 と表 2.1 に示す。図 2.3 に示すように、環境槽内の試験片評定部は上下から 2 枚の冷却プレートで挟まれており、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。試験片と冷却プレートの間には伝熱性を良くするためにインジウムシートを挟んでいる。極低温環境槽は二軸試験機の中央部に設置され、二軸負荷が加えられる十字型試験片の評定部を極低温に冷却する。環境槽内は、試験片評定部を断熱するために、排気装置を用いて高真空に保持される。極

低温となっている十字型試験片の中央評価部は環境槽内にあるが、十字型試験片の腕の端部は環境槽外に露出しており、常温となっている。十字型試験片に二軸負荷を加えるために、その露出している端部を二軸試験機の油圧グリップに取り付けている。

これまで、CFRP 十字型試験片を用いた極低温環境下における二軸試験を実施し、20K 程度の温度での負荷が可能であることを確認している。

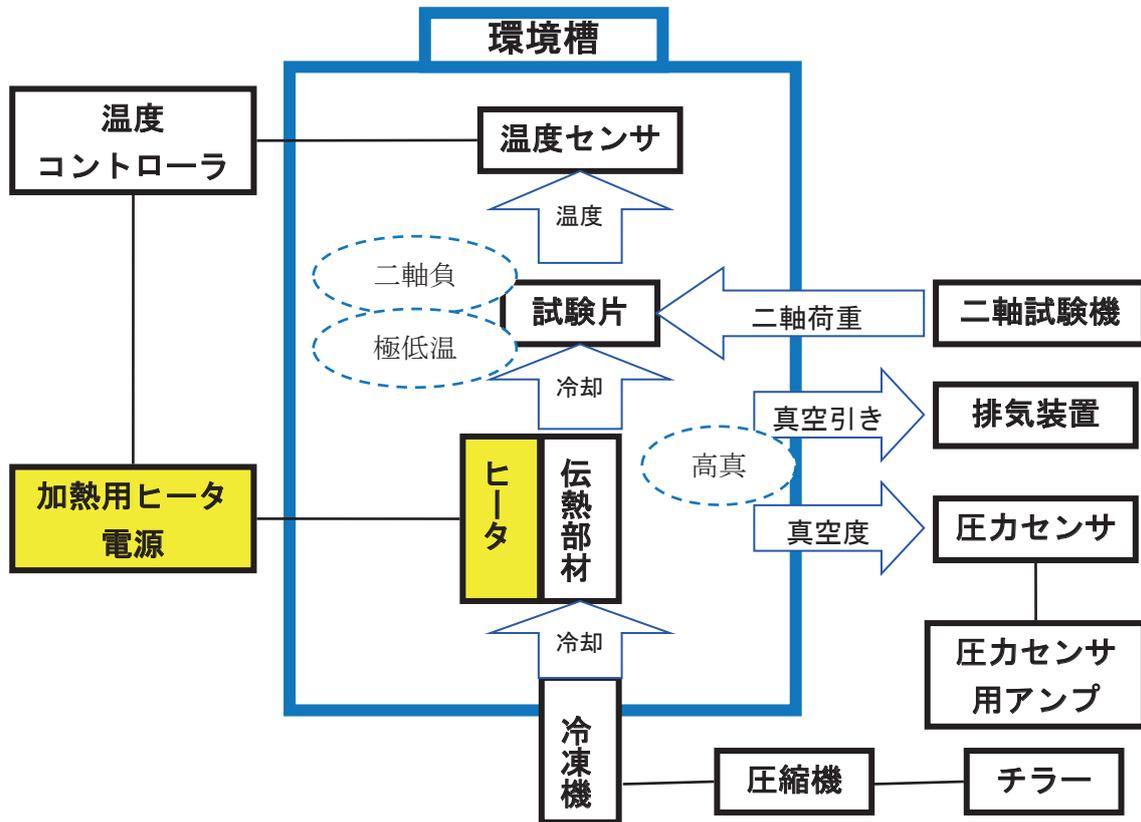


図 2.1 極低温環境槽概要 (黄色い枠が今回追加した部分)

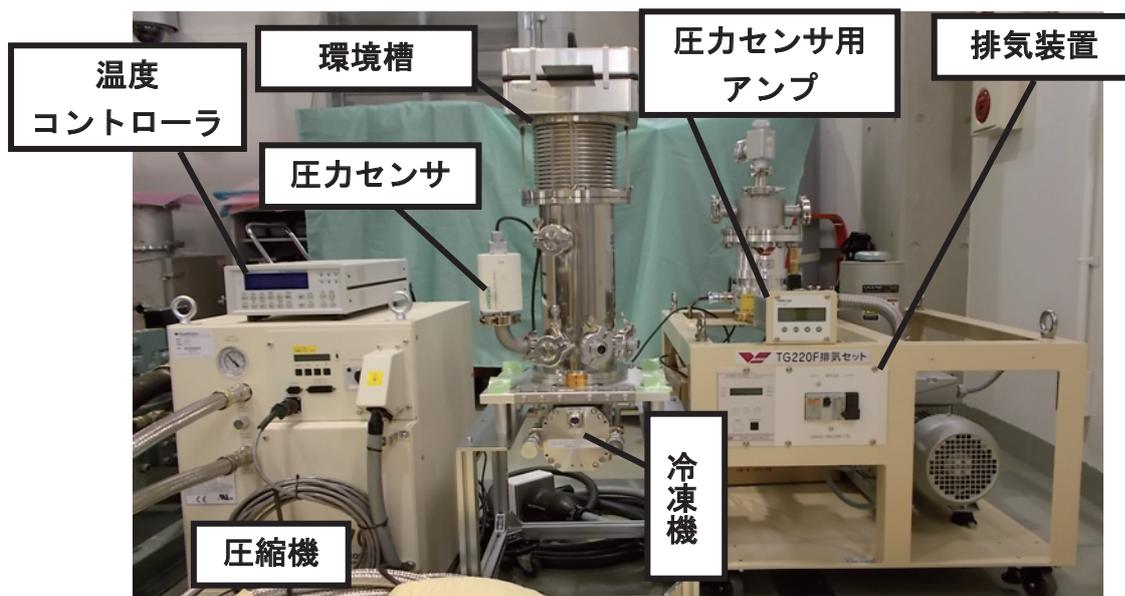


図 2.2 極低温環境槽構成部品 (伝熱部材、温度センサを除く)

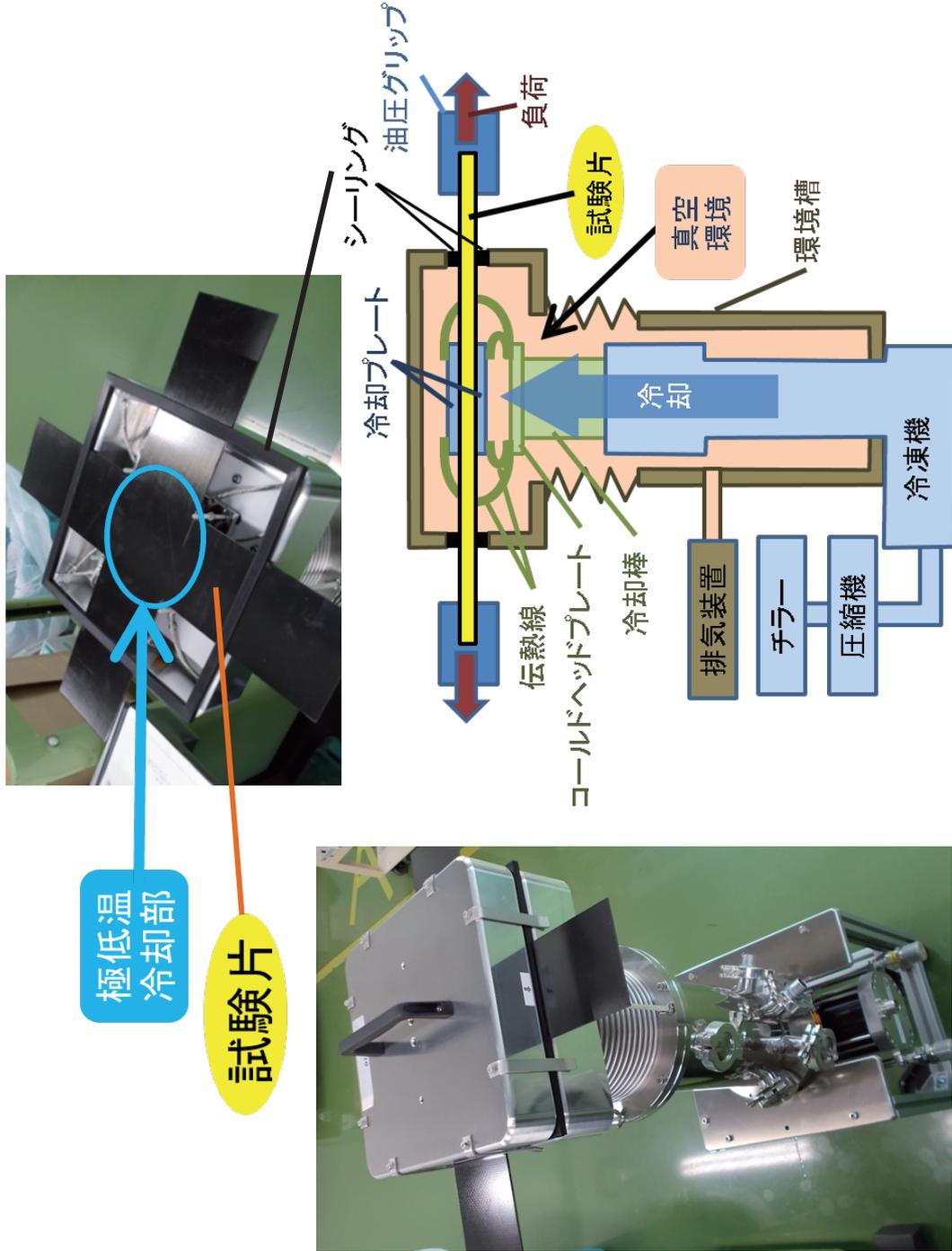


図 2.3 試験片の冷却と負荷の概要

表 2.1 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	-253°C (20K) 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-36 0CP-SP
測定範囲	$5 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^5 \text{Pa}$
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 温度調節システムの構成および機器の設定

3.1 温度調節システムの構成

温度調節システムは、図 3.1 に示すように、温度センサ、温度コントローラ、中継ボックス、加熱用ヒータ電源、ヒータ、ヒータと電源の間のスイッチより構成されている。温度調整システムの緒元を表 3.1 に示す。

温度センサは環境槽内にあり、冷却プレートなどに取り付けられている。ヒータは環境槽内のコールドヘッドプレートに内蔵した。図 3.2 にヒータを内蔵したコールドヘッドプレートを示す。温度センサ

は、2チャンネルあるが、温度コントロールに用いるセンサは1つのみであり、事前に温度コントロールに用いる温度センサを設定する。加熱用ヒータ電源は、温度コントローラから発生する電圧(0~10V)に比例した出力電圧(0~80V)を出力するように設定されている。温度コントローラでは、電圧出力のPID制御、または加熱率設定(電圧出力設定)を行う。PID制御では、目標温度を温度コントローラに設定し、目標温度より実温度が低い場合には、温度コントローラより電圧が加熱用ヒータ電源に出力され、ヒータが発熱する。加熱率設定を行う場合は、加熱率を温度コントローラに設定する。

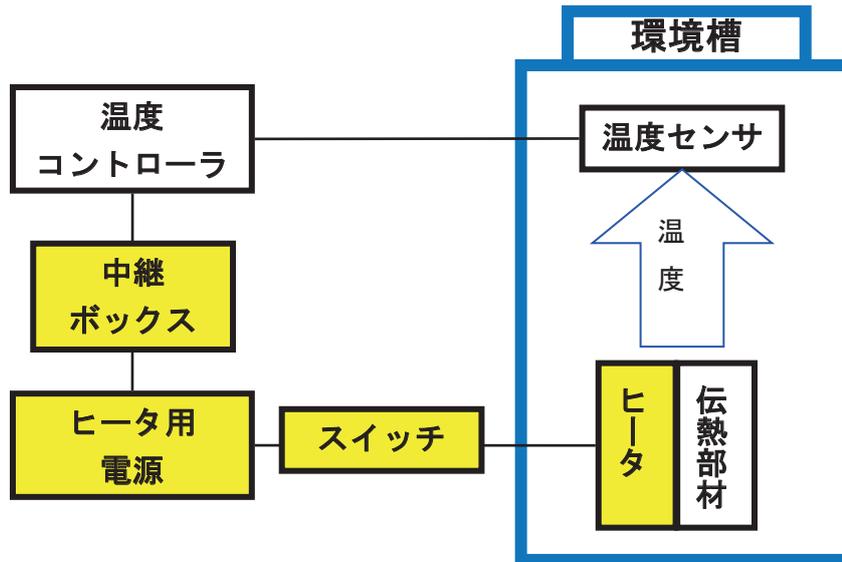


図 3.1 温度調節システム概要(黄色い枠が今回追加した部分)

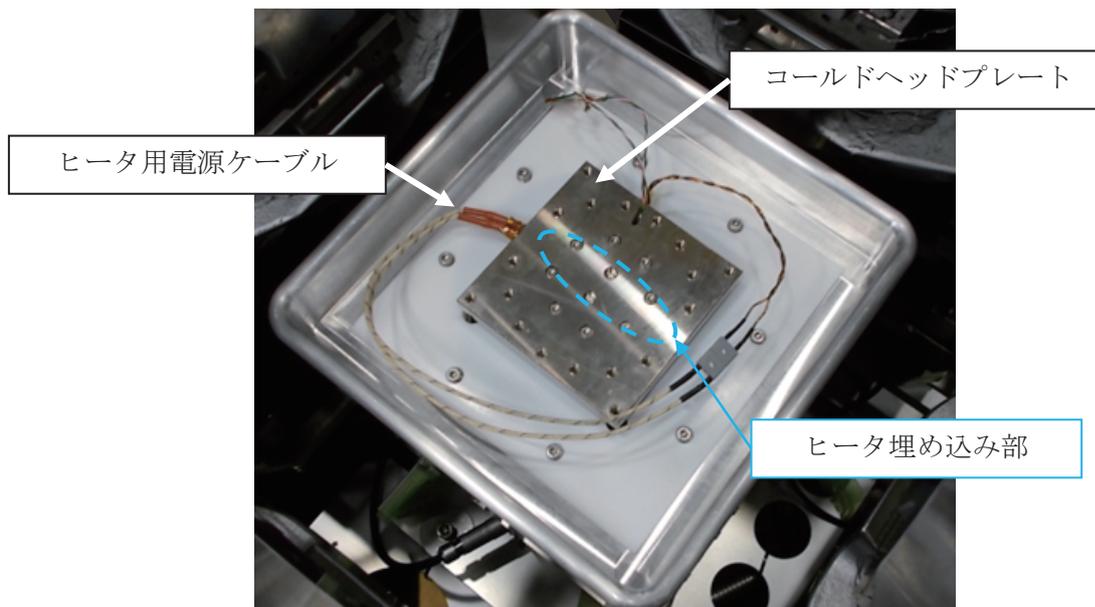


図 3.2 ヒータ内臓コールドヘッドプレート

表 3.1 極低温環境槽温度調整システムの緒元

温度コントローラ：Lakeshore 社製温度コントローラ Model 331	
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
制御方式	PID 制御ループ、または加熱率設定
最大加熱出力	50W
外部制御用出力	±10V
加熱用ヒータ：ワトロー社製ヒータ E2A83	
定格容量	300W
定格電圧	240V
ヒータ用電源：高砂製作所製電源 ZX-400HA	
定格出力電圧	640V
定格出量電流	5A
定格出力電力	400W

3.2 機器の設定

機器の設定前の接続においては、感電防止のため、電源のケーブルを外して行う。機器の接続および設定は以下の手順に沿って行う。

- ① 温度計測ケーブルに付属のヒータケーブルと電源用線を脱着コネクタで接続する(図 3.3)。
- ② ヒータのための電源用線を電源の背面 DC OUTPUT に接続し、[電源]と書かれた線を電源の背面の付属コネクタの 4 番(白色電源-)と 5 番(黒色電源+)に接続する(図 3.4)。
- ③ 図 3.5 のように [311]と書かれた線を、温度コントローラの背面のターミナルブロックの 7 番(黒色 331+)と 8 番(白色 331-)に接続する。
- ④ 図 3.6 のように[311]と書かれた線の中継ボックスに接続し、[電源]と書かれた電源側線を[311]と書かれた線の色に合わせてボックスに接続する。中継ボックスにより、温度コントローラがヒータ出力 100%(10V)となったときに、電源出力が 80V 出力となるように電圧が変換される。
- ⑤ 温度コントローラ(図 3.7)の設定を行う。[LOOP]ボタンを押し、表示を「L2」とし、Loop 2 で温度コントロールを行うようにする。[Input Setup]ボタンを押し、2 チャンネルある温度センサの温度制御に用いるセンサ(Input A または Input B)を選択し、センサータイプを「Silicon Diode」にし、カーブナンバーは、使用する温度センサの型番等に設定する。目標温度を設定し、PID 制御する場合は [PID/MHP]ボタンを押し、PID の値を設定し、加熱率(Manual Out)を 0%にする。PID 制御をせず、加熱率で温度調節を行う場合は、[PID/MHP]ボタンを押し、PID の値を 0%にする。
- ⑥ 高砂製作所製電源 ZX-400HA(図 3.8)の設定を行う。ファンクションキー[FUNC.]を押し[VOLTAGE]ツマミで設定項目番号「70」を選択し、[CURRENT]ツマミで「1」(外部電圧 0～10V)に変更し、[FUNC.]キーを押して終了する。

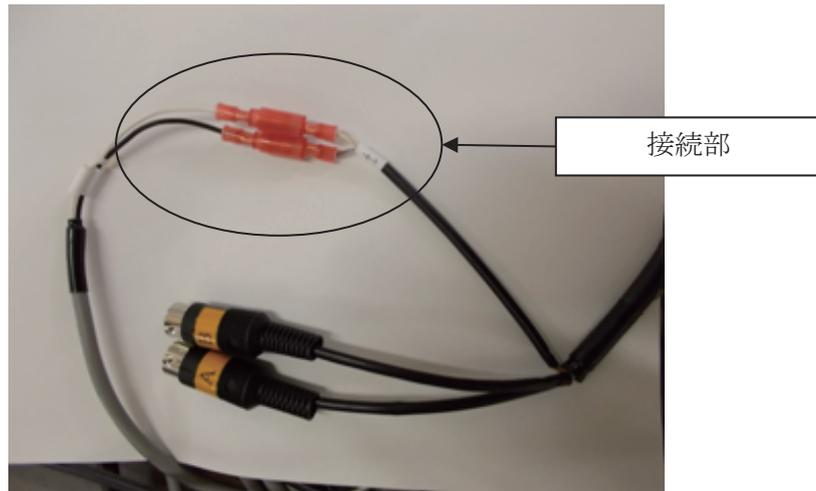


図 3.3 ヒータケーブルと電源用線の接続

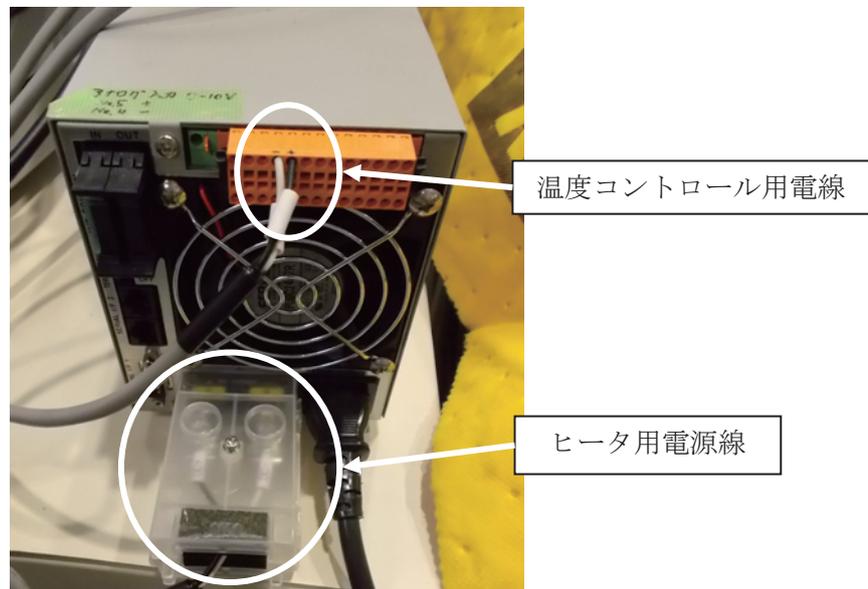


図 3.4 ヒータ用電源線の電源背面への接続



図 3.5 加熱制御用電圧出力用線の温度コントローラへの接続

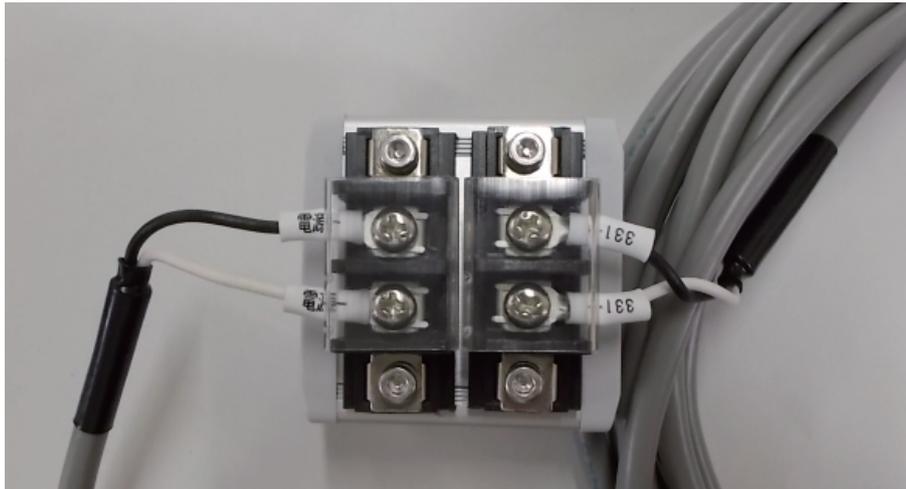


図 3.6 加熱制御用電圧出力用線と電源外部電圧制御用線の中継ボックスでの接続



図 3.7 温度コントローラ



図 3.8 加熱用電源

4 操作手順

4.1 温度調節手順

温度コントローラの前面ボタンを操作し、温度調節設定を行う。外部の計算機などから GPIB を用いて温度コントローラからデータ収集している場合（温度コントローラの[Remote]ランプが点灯）は、温度コントローラのボタンの操作が無効となっている。そのような状態で温度コントローラのボタンを操作する場合は、[Remote/Local]ボタンを押し、[Remote]ランプが消えている間に操作を行う。

まず、温度コントロールを開始する前に、1)加熱用電源が OFF になっていること、2)加熱用電源とヒータの間にあるスイッチ(図 4.1)が「切」になっていること、3)温度コントローラの制御ループがループ 2 となっていること(温度コントローラ右下画面が「Off L2」となっていること)を確認する。

PID 制御での温度設定は、[Setpoint]ボタンを押し、設定温度を入力する。ヒータの発熱能力や冷凍機の保護のため、温度の設定範囲は 20K から 100K 程度を目安とする。加熱率を設定する場合は、[PID/MHP]ボタンを押し、PID の値を 0%に設定し、「Manual Out」の値を所定の加熱率(%)を設定する。加熱率を設定する場合は、冷凍機が起動していない状態でも加熱が行われ、冷凍機の加熱により不具合を起こす可能性がある。そのため、加熱率を設定する場合は、冷凍機が起動し、評価部周辺が冷却中であることを確認する。

温度コントローラの温度調節設定後、電源とヒータにあるスイッチ(図 4.1)を「入」にし、温度コントローラの[Heater Range]ボタンを押し、[▼]/[▲]ボタンを押し ON にする。この時温度コントローラ右下画面が「Off L2」から「X% L2」(X%は加熱率)となっていることを確認する。加熱用電源(図 3.8)を起動し、[OUTPUT]ボタンを押すと、ヒータに通電され、加熱が開始される。加熱用電源の電圧と電流を確認し、通電されていることを確認する。

目標温度設定を変える場合は、[Setpoint]ボタンを押し、目標温度を再設定する。加熱率を変える場合は、[PID/MHP]ボタンを押し、加熱率を再設定する。



図 4.1 電源とヒータの間のスイッチ

4.2 温度調節終了手順

温度調節を終えるには、まず加熱用電源の[OUTPUT]ボタンを押し、ヒータへの通電を止め、加熱用電源の主電源を切る。その後、温度コントローラの[Heater Off]ボタンを押し、温度制御を OFF にする。最後に、加熱用電源とヒータの間にあるスイッチ(図 4.1)を「切」にする。

5 性能確認試験

極低温環境槽システムに追加した温度調節システムを用いて性能確認試験を実施した。本章にて性能確認試験の試験条件と試験結果を示す。

5.1 試験条件

温度調節の確認において、図 5.1 に示す形状の CFRP 十字型試験片(板厚 2mm)を用い、性能確認試験を行った。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 $(0/90)_{4S}$ である。図 5.2 に試験片を極低温環境槽に取り付けた状態を示す。試験片評定部の断熱のためにニトリルゴム製の四角いシーリングを十字型試験片に取り付けている。試験片評定部は上下から冷却プレートに挟まれる。

冷却プレートには、冷却プレートと冷凍機を熱的につなげるための伝熱線が四隅に取り付けられ、温度測定用の温度センサを中央に取り付けている。本性能確認試験においては、上側冷却プレートに接続している伝熱線の本数を 28 本、下側冷却プレートに接続している伝熱線の本数を 24 本とした。本性能確認試験では上側冷却プレートの温度を PID 制御のフィードバックの対象とした。また、PID 制御では P を 86.4(%)、I を 8.9(%)、D を 100(%) と設定した。

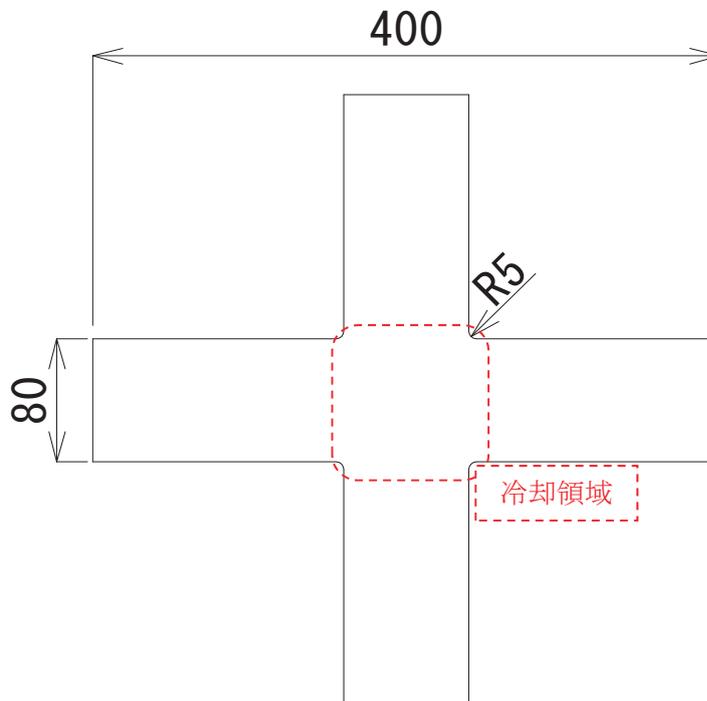


図 5.1 十字型二軸試験片(単位:mm, 板厚 2mm)

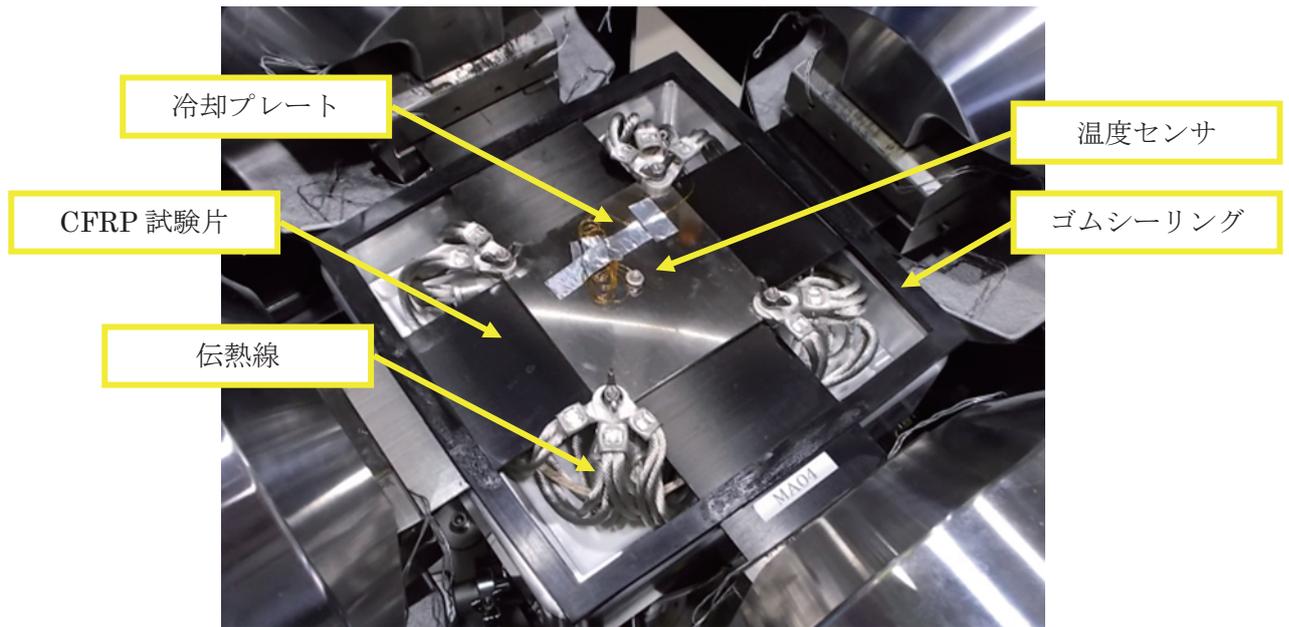


図 5.2 試験片取り付け状態

5.2 性能確認試験結果

性能確認試験では、まず 20K まで冷却後 1 時間以上保持し、温度が十分安定してから温度調節を実施した。温度調節目標は 77K と 90K の 2 つの温度とした。温度調節結果を図 5.3 に示す。図 5.3 には上側冷却プレートと下側冷却プレートの温度を示している。

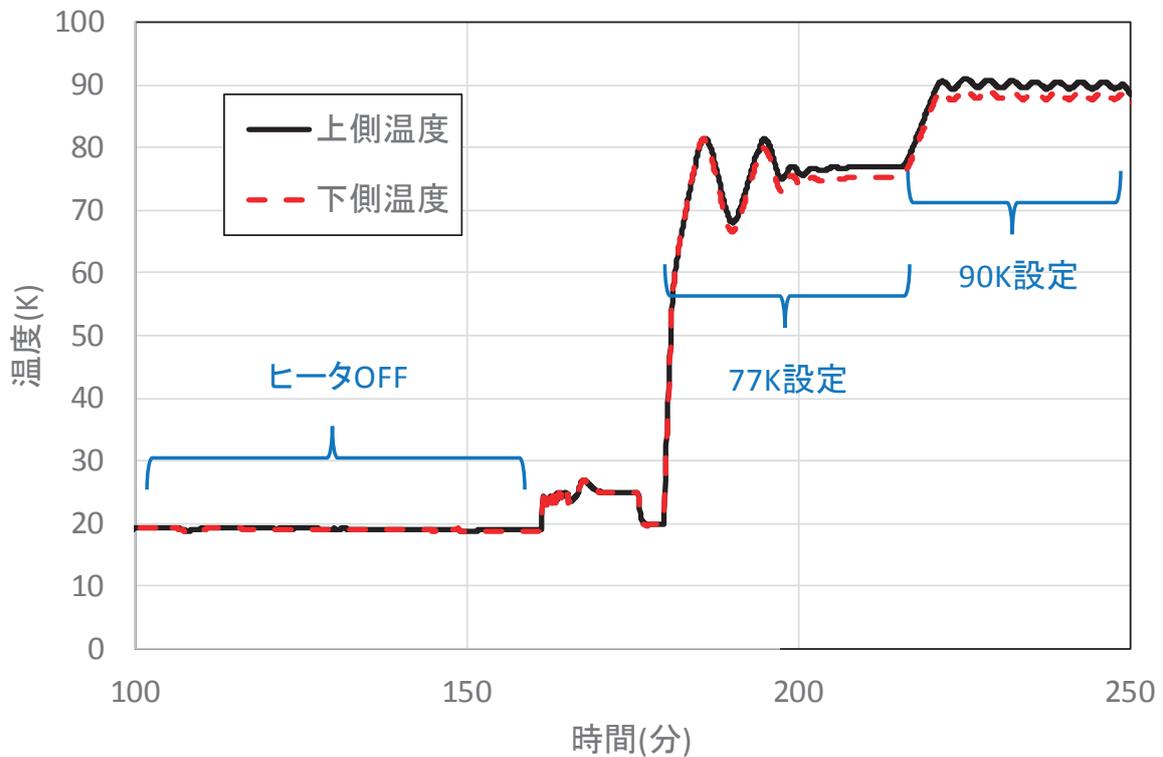


図 5.3 温度調節試験結果

図5.3においてヒータで加熱されていない状態(ヒータOFF)では上側冷却プレートと下側冷却プレートの温度は一致しているが、温度調節を行っている状態では両冷却プレートの温度に差が生じている。加熱用ヒータは図3.2に示すようにコールドヘッドプレートの中央部に埋め込んであり、上側の冷却プレートに接続している伝熱線のコールドヘッドプレートへの取り付け位置が、ヒータの発熱部に比較的近いいため、上側の温度がわずかに高くなったと考えられる。上下の温度差を減らすためには、コールドヘッドプレートへの伝熱線の取り付け位置を調整する必要がある。

77Kを目標とした場合、温度調節開始当初は目標温度より数Kオーバーシュートとするが、約20分程度で温度が安定することが図5.3より分かる。一方90Kを目標として設定した場合、調節開始時点での大きなオーバーシュートはないが、温度の振動が収まらなかった。このような温度振動を無くすためには、PDIの設定の変更や、加熱率のみの調節を行うなど今後検討する必要がある。

6 おわりに

航空宇宙機の極低温にさらされる構造材料の模擬試験のために開発した冷凍機式極低温環境槽に対して、温度調節を行うための温度調節システムを追加した。従来の温度調節は、伝熱部材の変更などによる受動的な温度調整しかできななかったが、試験温度調節を容易にするため、温度調節システムは加熱を行う能動的なタイプとした。本報告では、追加した温度調節システムについて、極低温環境槽の概要、システム構成、設定、操作手順をまとめた。十字型CFRP試験片に対して温度調節を行った性能確認試験データもまとめ、温度調節が可能であることを示した。また、性能確認試験の結果、ある温度域では温度振動が発生することが確認された。今後、冷却速度の改善のために伝熱線本数の増加や、温度調節における温度振動の抑制のための温度調節設定などの検討が必要であることが明らかとなった。

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, 2014.
- 4) 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2: 二軸力学特性試験), 宇宙航空研究開発機構研究開発資料, JAXA-RM-15-005, 2016.

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-17-003
JAXA Research and Development Memorandum

十字型二軸力学特性試験用極低温環境槽温度調節システム

A temperature control system for a cryogenic environmental chamber for biaxial mechanical property testing

発行 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1
URL: <http://www.jaxa.jp/>

発行日 平成29年9月15日
電子出版制作 松枝印刷株式会社

©2017 JAXA

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。

Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

