

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

電動モータグライダーシステムの バッテリーポッド強度試験

吉村 彰記, 平野 義鎮, 西沢 啓

2015年3月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

電動モータグライダーシステムのバッテリーポッド強度試験

吉村 彰記^{*1}, 平野 義鎮^{*1}, 西沢 啓^{*1}

Structural test of the Battery Pod Frame of the Electric Motor Glider System

Akinori YOSHIMURA^{*1}, Yoshiyasu HIRANO^{*1}, and Akira NISHIZAWA^{*1}

Abstract

This research memorandum reports the method and results of the structural test for the battery pod frame used in the electric-motor-driven glider. The electrical propulsion system used in the glider was developed in IAT, JAXA, and it is being demonstrated by flight tests. The flight test program is called FEATHER (Flight Demonstration of Electric Aircraft Technology for Harmonized Ecological Revolution). For the structural tests, we prepared three specimens (#1-#3). Actual load to be expected in service, design limit load, and ultimate load were applied to specimen #1 in both vertical and horizontal directions. For specimens #2 and #3, only actual load was applied in order to check the equivalency to specimen #1. Test results of specimen #1 demonstrated that plastic deformation did not occur in specimen #1 at design limit load, and that fracture did not occur in specimen #1 at ultimate load for a period of three seconds. Therefore it was demonstrated that the pod frame has sufficient margin of safety. Test results of specimens #2 and #3 demonstrated that they are equivalent to specimen #1.

Key words: Structural test, FEATHER, Battery pod

概要

本報告は、宇宙航空研究開発機構、航空本部航空技術実証研究開発室にて実施されている、研究事業「航空機用電動推進システム技術の飛行実証」(FEATHER)に際し、実証試験機のエネルギー源となるバッテリーを搭載するポッドフレームが所定の強度を有していることを確認するために実施した、強度試験について報告する。本試験ではポッドフレーム供試体3点に対して試験を実施した。ポッドフレーム供試体#1に対しては実荷重試験・制限荷重試験・終局荷重試験を垂直方向・水平方向の荷重のそれぞれに対して実施した。一方、実フライト品であるポッドフレーム供試体#2、#3に対してはポッドフレーム#1との同等性を確認するため、垂直方向・水平方向の実荷重試験のみを実施した。各試験の結果、ポッドフレーム供試体#1は垂直方向・水平方向の制限荷重において有害な塑性変形を生じないことが確認できた。また、ポッドフレーム供試体#1は垂直方向・水平方向の終局荷重において3秒間以上破壊せず、終局荷重に対して十分な強度余裕を有することがわかった。ポッドフレーム#2、#3は垂直方向、水平方向ともにポッドフレーム#1と同等性が確認された。

* 平成26年12月18日受付 (Received 18 December, 2014)

*1 航空本部 航空技術実証研究開発室
(Technology Demonstration Research Office, Institute of Aeronautical Technology)

1. 緒言

電動モータはレシプロエンジン等と比較してエネルギー変換効率が高く、また整備が容易であるため、航空機を電動化することによって燃費や整備費を大幅に低減できる可能性がある。宇宙航空研究開発機構航空本部航空技術実証研究開発室では、航空機電動化において特に重要な技術である、航空機用電動推進システム技術を飛行実証する研究事業、FEATHER (Flight demonstration of Electric Aircraft Technology for Harmonized Ecological Revolution)を実施している。FEATHER では、ダイヤモンド・エアクラフト社製モータグライダ HK36TTC-ECO の推進システムを JAXA で開発した航空機用電動モータに置き換え、これを航空機用リチウムイオンバッテリーの電力によって駆動する(図 1)。バッテリーはモータグライダの両主翼下のポッドに格納される。FEATHER 事業では本機体を用いてジャンプ飛行、場周飛行を行い、電動化推進技術、およびこれを用いたエネルギー回生等について技術実証を行う予定である¹⁾。

FEATHER 事業では HK36TTC-ECO の機体構造については出来る限りこれを変更せず、そのまま利用する方針を取っているが、バッテリーを格納する主翼下ポッドのフレームについては、既存品の寸法がバッテリー寸法と整合せず、新規に製作することとした。飛行実証試験を実施するためには新規製造するポッドフレームが、耐空性審査要領(第VI部第3章 3-11-4)で要求される所定の強度を有していることを確認する必要があった。このため、航空本部航空技術実証開発室では、実際に製作したポッドフレームに対し荷重を負荷する強度試験を実施した。本報告では強度試験の方法・実施結果について報告する。



図1 電動化モータグライダシステムの概念図

2. 供試体および試験方法

2.1 供試体

本試験に用いた電動航空機ポッドフレーム供試体は3体であり、それぞれ#1、#2、#3と呼称する。各供試体は同一材料、同一製作方法にて製作されている。#1 供試体については運用実荷重まで負荷する試験(以下、実荷重試験と呼称する)、制限荷重試験および終局荷重試験の三種の試験を実施した。#2、#3の供試体は実機搭載品であり実荷重試験による実体保障を行うこととした。実荷重条件下での#1 供試体との同等性を示すことで、終局荷重に対する安全性を確認することとした。供試体の鳥瞰図を図2に示す。

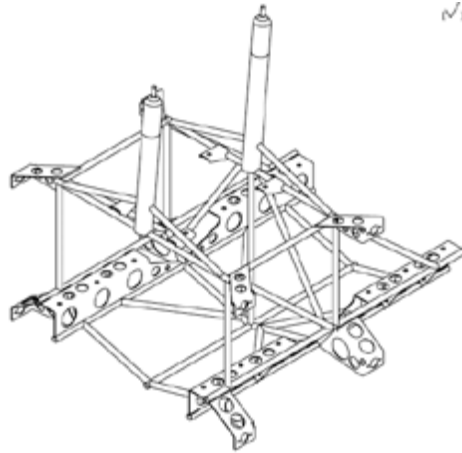


図2 ポッドフレーム供試体鳥瞰図

2.2 荷重条件

本試験での荷重条件は以下の通りとした。ただし、バッテリーの重量を1つあたり $m_R=28.5\text{kg}$ 、カウル重量を $m_{cowl}=5.0\text{kg}$ 、フレームの自重 $m_{ow}=3.084\text{kg}$ とする。なお、バッテリー一つあたりの最大搭載重量は $m=40.0\text{kg}$ とした。ポッドフレームはバッテリー2つ分の慣性力を支えなければならない。また、本ポッドフレームを装着する航空機のマニューバ時の最大荷重倍数 n_{max} は3.2G、水平方向の最大荷重倍数 n_{side} は1.5Gである。

2.2.1 垂直方向荷重条件

a) 実荷重条件

$$F_{vact} = (2m_R + m_{cowl} + m_{ow})gn_{max} = (2 \cdot 28.5 + 5 + 3.048) \cdot 9.81 \cdot 3.2 = 2043.1 \text{ N} = 208.2 \text{ kgf}$$

b) 制限荷重条件

$$F_{vLMT} = 2mgn_{max} = 2 \cdot 40.0 \cdot 9.81 \cdot 3.2 = 2511.4 \text{ N} = 256 \text{ kgf}$$

c) 終局荷重条件

$$F_{vULT} = 1.5 \cdot 2mgn_{max} = 1.5 \cdot 2 \cdot 40.0 \cdot 9.81 \cdot 3.2 = 3767.0 \text{ N} = 384 \text{ kgf}$$

2.2.2 水平方向荷重条件

a) 実荷重条件

$$F_{hact} = (2m_R + m_{cowl} + m_{ow})gn_{max} / 3 = 681.0 \text{ N} = 69.4 \text{ kgf}$$

b) 制限荷重条件(1)

$$F_{hLMT1} = F_{vLMT} / 3 = 837.1 \text{ N} = 85.3 \text{ kgf}$$

c) 制限荷重条件(2)

$$F_{hLMT2} = 2mgn_{side} = 2 \cdot 32.5 \cdot 9.81 \cdot 1.5 = 957.5 \text{ N} = 97.5 \text{ kgf}$$

なお、この条件はバッテリー重量が他と異なっているが、これは解析値との比較のため条件を合わせていることが原因である。実際の重量での試験は d)で行う。

d) 制限荷重条件(3)

$$F_{hLMT3} = 2mgn_{side} = 2 \cdot 40 \cdot 9.81 \cdot 1.5 = 1177.2 \text{ N} = 120 \text{ kgf}$$

e) 終局荷重試験(1)

$$F_{hULT1} = F_{vULT} / 3 = 1255.7 \text{ N} = 128 \text{ kgf}$$

f) 終局荷重試験(2)

$$F_{hULT2} = 1.5 \cdot 2mgn_{side} = 1434.7 \text{ N} = 146.3 \text{ kgf}$$

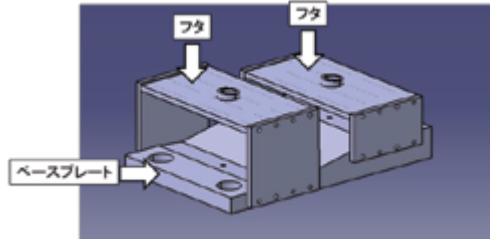
なお、この条件では c)と同様、バッテリー重量が他と異なっている。

g) 終局荷重試験(3)

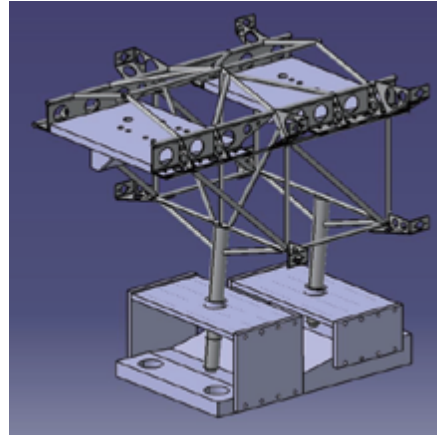
$$F_{hULT3} = 1.5 \cdot 2mgn_{side} = 1765.8 \text{ N} = 180 \text{ kgf}$$

2.3 ジグおよび供試体の取り付け

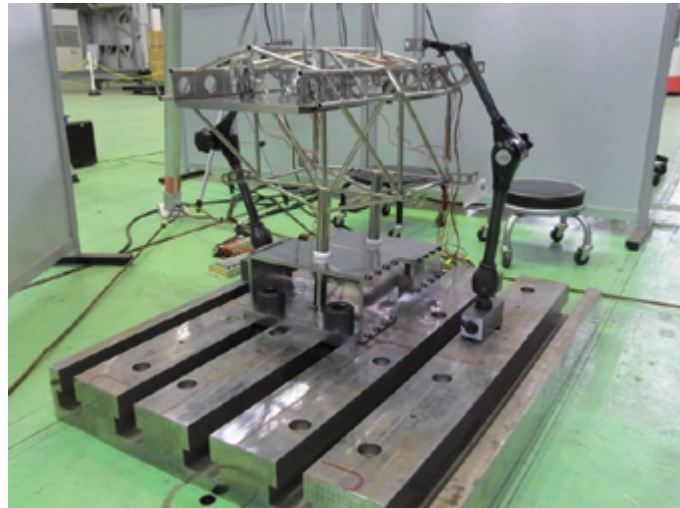
供試体取り付け供試体取り付け用ジグの概念図を図 3(a)に、取り付けイメージを図 3(b)に、実際に取り付けられたジグの写真を図 3(c)に示す。供試体は実際の主翼への取付方向とは上下逆向きに設置される。ジグはベースプレートとフタから構成され、フタには POM 樹脂製カラーを取り付けている。これは実機の主翼構造を模している。また、ベースプレートと供試体の締結は主翼への取り付けと同じ締結条件とし、M8 の滑り止めナットを用い、16Nm のトルクを用いて締結した。トルクはトルクレンチを用いて管理された。ベースプレートは地上設置の T スロットにボルト締結した。



(a) 荷重負荷試験用ジグ



(b) ポッドフレーム取り付け図



(c) 供試体取り付け写真

図3 荷重負荷試験用ジグ

2.4 試験セットアップ

2.4.1 垂直荷重試験セットアップ

試験は垂直方向に負荷する垂直荷重試験と、水平方向に負荷する水平荷重試験の2種類のセットアップで実施した。垂直荷重試験のセットアップ状況を図4に示す。垂直方向試験では、アルミ三脚(長谷川工業株式会社製 アルクレーン)にチェンブロックを、チェンブロックに電気抵抗線式はかり(クボタ製 HS-CD-30)をそれぞれ取り付け、はかりと荷重負荷用治具を玉掛けワイヤーを用いて締結した。荷重負荷用治具の図面を図5、図6に示す。ここでM16のメネジ部分にはM16アイボルトをねじ入れ、玉掛けワイヤーと締結している。M16のメネジ位置は、電動航空機に搭載されるバッテリーの水平方向の重心位置に等しくなるように設定している。荷重はチェンブロックを巻き上げる事によって付加した。このときの負荷荷重は電気抵抗線式はかりを用いて計測した。

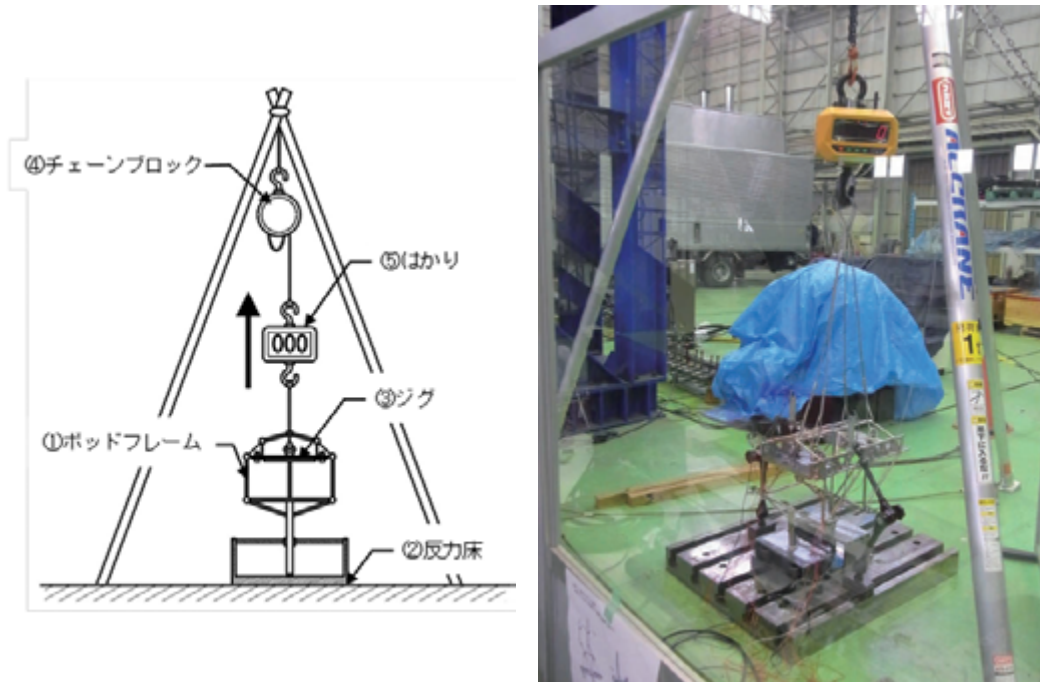


図4 垂直荷重試験のセットアップ

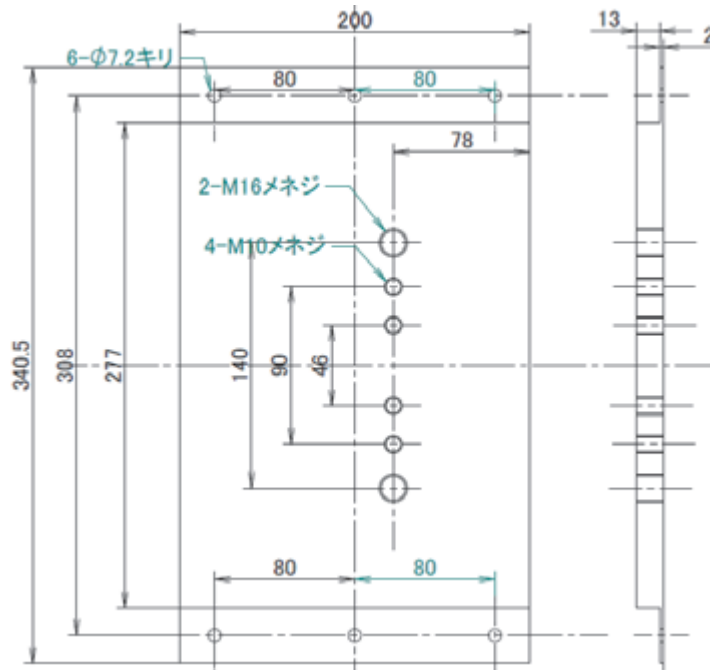


図5 荷重負荷用治具(前側)

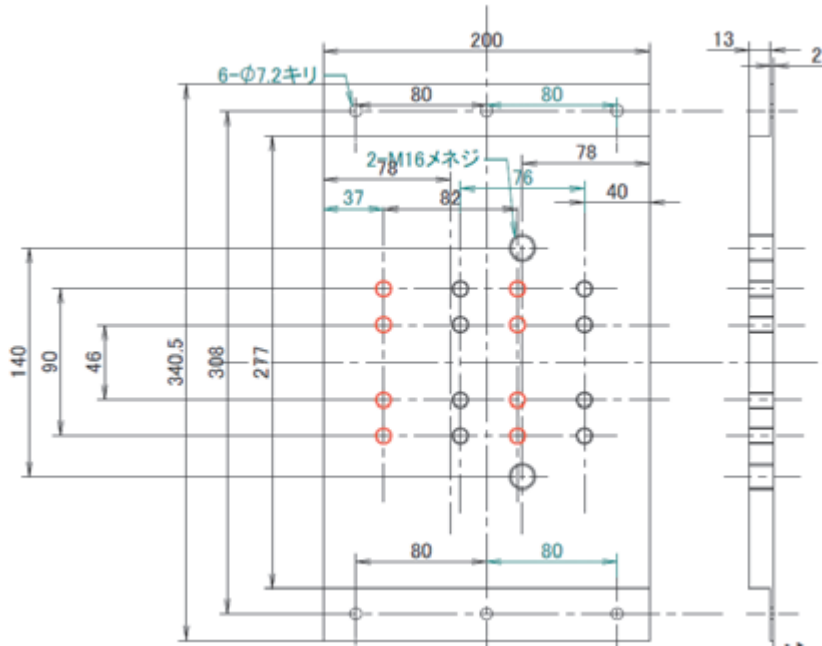


図 6 荷重負荷用治具(後ろ側)

2.4.2 水平荷重試験セットアップ

水平方向試験のセットアップを図 7 に示す。水平方向荷重試験のセットアップでは、アルミ三脚とチェーンブロック、はかりを取り付けた後、滑車を用いてワイヤーの方向を 90° 曲げ、荷重負荷用治具に取り付けたブラケット(図 8)とワイヤーを締結している。なお、滑車の反力は反力床等と滑車をスリングベルトで締結することによって負担している。ブラケットの位置は電動航空機のバッテリーの重心の水平、垂直位置と一致するように設定している。

供試体下側のセットアップは垂直荷重試験と同一であるが、横方向荷重が高い場合は T スロットテーブルごと横滑りしてしまう可能性がある。この際は T スロットテーブル自体を反力床とスリングベルトで締結することにより横滑りを防止した(図 9)。

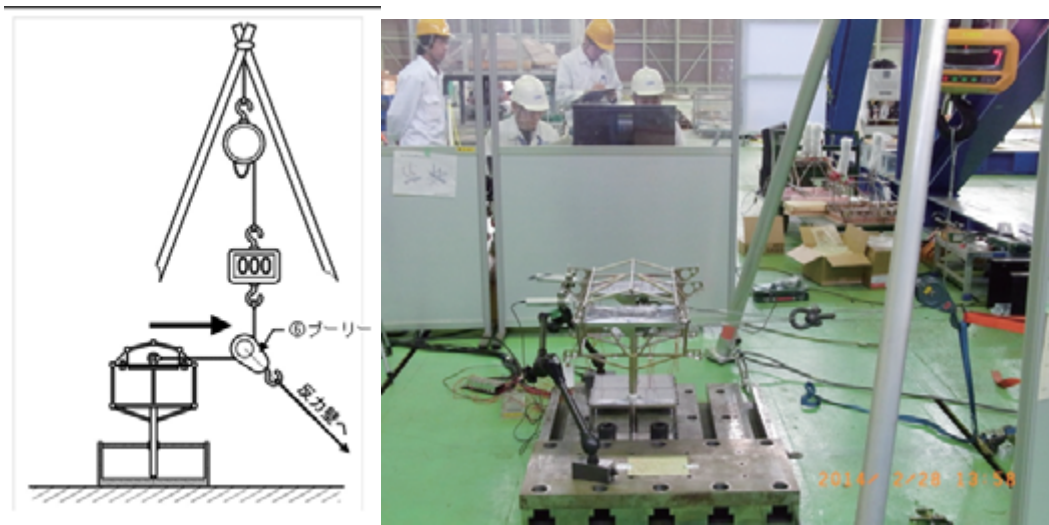


図 7 水平方向試験セットアップ

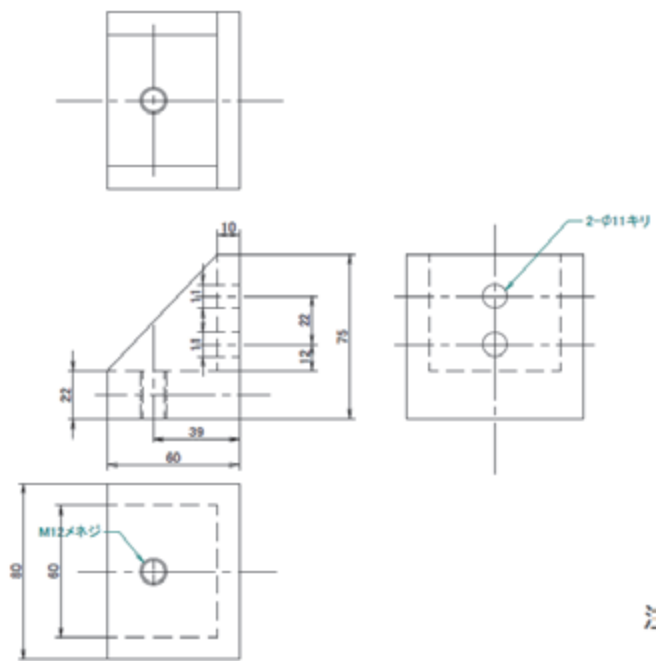


図 8 横荷重負荷用ブラケット

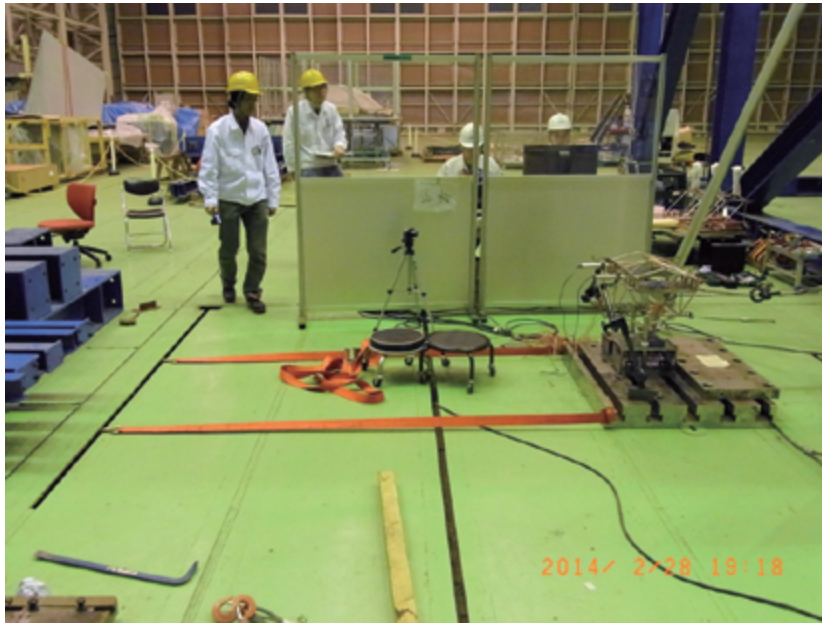


図 9 T スロットテーブルの固定

2.5 計測点

2.5.1 ひずみの計測点

ひずみの計測位置の概要図を図 10 に示す。左右対称にゲージを貼付した(図 10 では片側のみ表示されている)。なお、P-01 と P-02 については#1 供試体の試験のみ使用した。このため、ひずみの計測点は#1 供試体では合計 14 箇所、#2、#3 供試体では 10 箇所となった。このうち、P-01 から P-04 は横荷重負荷試験の計測点として使用した。一方、P-05 から P-07 は垂直荷重負荷試験の計測点として使用した。ひずみゲージは部材の軸方向に平行に取り付けた。ひずみゲージには共和電業製 KFG-3-120-C1-11L3M2R を、ゲージの接着には共和電業製ひずみゲージ接着剤、CC-33A を用いた。

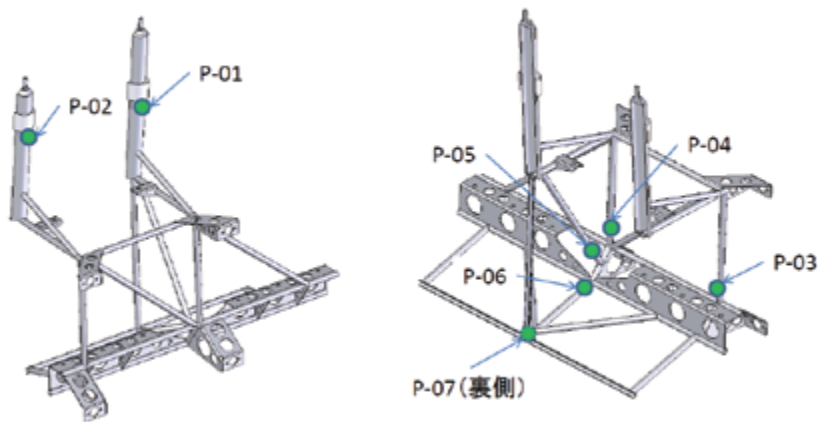


図 10 ひずみゲージ貼付ポイント

2.5.2 変位の計測点

変位は変位計(共和電業製 DTH-A-50)を用いて測定した。測定点は各試験 2 箇所とした。垂直方向荷重試験の測定点を図 11 に、水平方向荷重試験の測定点を図 12 に示す。

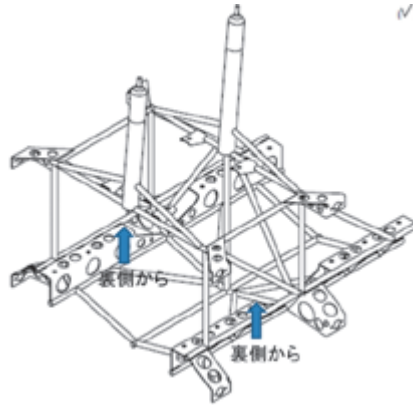


図 11 垂直方向荷重試験での変位測定位置

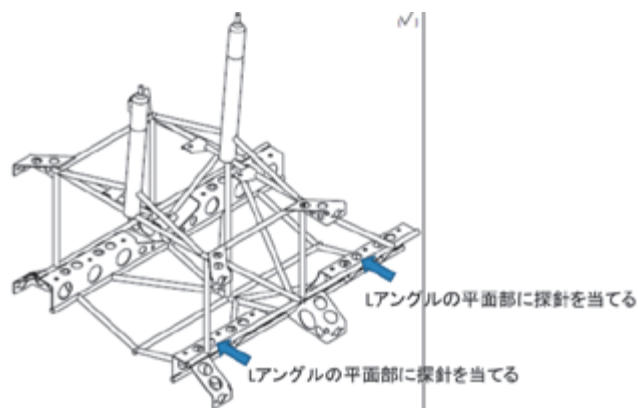


図 12 水平方向荷重試験での変位測定位置

3. 試験結果

3.1 #1 供試体への実荷重、制限荷重試験(垂直方向)結果

試験手順は以下の通りとした。負荷荷重値の設定については 2.2 節を参照のこと。

1. 荷重負荷用ワイヤーが完全に緩んだ状態とし、荷重のゼロ点を設定した。
2. ひずみゲージ・変位計の内部感度登録、バランスを実施、ゼロ点を設定した。
3. データロガーを起動、データ取得を開始した。
4. チェーンブロックにより制限荷重の 40%($102.4+13.22 \approx 116\text{kg}$)以上まで負荷した。
5. チェーンブロックを緩め、荷重の読みがポッドフレームの自重及び荷重負荷用ジグの重量の合計 ($80+13.22 \approx 93\text{kg}$)まで荷重を緩めた。

6. この時の荷重、ひずみ、変位を記録した(データ 1A)
7. チェーンブロックにより荷重を負荷した。この間、制限荷重 50%、60%、70%、80%(141、166、192、217kg)での荷重、ひずみ、変位の読みを記録した。
8. 荷重を実荷重(221kg)とし、荷重、ひずみ、変位の読みを記録した(データ 1B)
9. チェーンブロックにより荷重を負荷した。この間、制限荷重 90%(244kg)で荷重、ひずみ、変位の読みを記録した。
10. チェーンブロックにより制限荷重 (269kg)まで荷重を負荷し、荷重、ひずみ、変位の読みを記録した(データ 1C)。
11. チェーンブロックを読みが 93kg になるまで緩め、荷重、ひずみ、変位の読みを記録した(データ 1D)。
12. データロガーの記録を停止した。

なお、本実験は 2 回中断し、都合三度に分けて実施した。一回目の試験は 93kg 負荷の後、データロガーの変位計の表示桁数の調整のため除荷した。二回目は 192kg の負荷の後、変位計表示が逆方向へ動いたため、様子を見るために除荷した。三回目の実験で実荷重、制限荷重を達成した。試験時に記録したひずみゲージ、伸び計の値の読みを表 1 に示す。また、実荷重、および制限荷重負荷時の写真を図 13、図 14 にそれぞれ示す。データラベル 1A のデータとデータラベル 1D のデータを比較すると、ひずみは最大で $3\mu\epsilon$ 、変位は 0.032mm の差であった。両者の差はわずかであり、ボッドフレーム供試体#1 は垂直方向の制限荷重において有害な塑性変形を生じないことが確認できた。

表 1 #1 供試体実荷重・制限荷重試験(垂直方向)結果記録

電動化航空機用ポッドフレーム強度確認試験(垂直方向試験)
#1供試体実荷重・制限荷重試験

試験日		2014.2.27		記録者		吉村 彰記		試験時メモ											
開始時刻		14:14						一回目は93.2の後、一旦除荷。変位計の表示桁数の調整のため											
室温		13℃						二回目は192で除荷。変位計が逆方向に動いたため											
湿度		19%		ゲージ率		2.07		三回目は93の後、218に 変位計No2はデータ異常。											
荷重 (kg)		P5L		P5R		P6L		P6R		P7L		P7R		伸び計の読み		データラベル		備考・メモ	
目標荷重	荷重の読み	ひずみゲージの読み(με)	ひずみゲージの読み(με)	ひずみゲージの読み(με)	ひずみゲージの読み(με)	ひずみゲージの読み(με)	ひずみゲージの読み(με)	ひずみゲージの読み(με)	ひずみゲージの読み(με)	ひずみゲージの読み(με)	ひずみゲージの読み(με)	ひずみゲージの読み(με)	ひずみゲージの読み(με)	No1	No2				
115.6	116	-	105	-	-145	-135	-129	-	-	-126	0								
93.2	91	113	103	-	-148	-138	-129	-	-	-129	-126	0.032							
115.6	115	-	103	-	-222	-208	-197	-	-	-193	0.21	0.04							
93.2	93	113	158	-	-262	-245	-233	-	-	-227	0.264	0.031							
141.2	141	169	186	-	-301	-279	-266	-	-	-262	0.328	0.015							
166.8	166	201	214	-	-	-	-	-	-	-	-	-							
192.2	192	235	105	-	-146	-135	-130	-	-	-124	0.12	0.015							
115.6	116	-	105	-	-341	-316	-302	-	-	-298	0.366	-0.014							
93.2	93	114	246	-	-348	-325	-311	-	-	-300	0.37	-0.008							
218	217	264	251	-	-381	-351	-337	-	-	-329	0.415	-0.015							
221.4	221	270	311	-	-418	-390	-375	-	-	-362	0.458	-0.015							
243.6	244	298	311	-	-149	-133	-130	-	-	-126	0.15	0							
269.2	269	331	104	-	-	-	-	-	-	-	-	-							
93.2	93	116																	

合格欄 試験実施計画の合格基準に照らして 合格



図 13 #1 供試体垂直方向実荷重負荷時の写真



図 14 #1 供試体垂直方向制限荷重負荷時の写真

4.2 #1 供試体への終局荷重試験(垂直方向)結果

試験手順は以下のとおりとした。なお、本試験では 295kg まで付加した際にひずみゲージの計測レンジがオーバーしたため、一旦除荷してゲージのレンジを修正の上、再実施した。

1. 荷重がバッテリーポッドの自重、バッテリーの自重及び荷重負荷用ジグの重量の合計(93kg)になるまで負荷した。
2. 荷重を終局荷重(398kg)以上とし、3 秒間待機した。
3. 荷重を制限荷重の 160%(423kg)以上とし、3 秒間待機した。
4. 荷重を制限荷重の 170%(449kg)以上とし、3 秒間待機した。
5. 荷重を 93kg まで除荷した。

試験の結果、終局荷重、160%荷重、170%荷重以上の各荷重において、#1 供試体は 3 秒間破壊することはない。以上からポッドフレーム供試体#1 は垂直方向の終局荷重に対して十分な強度余裕があることが確認できた。安全余裕は $449/397.2-1=0.13>0$ であった。終局荷重、160%荷重、170%荷重時の写真を図 16-18 にそれぞれ示す。



図 16 #1 供試体垂直方向終局荷重負荷時の写真

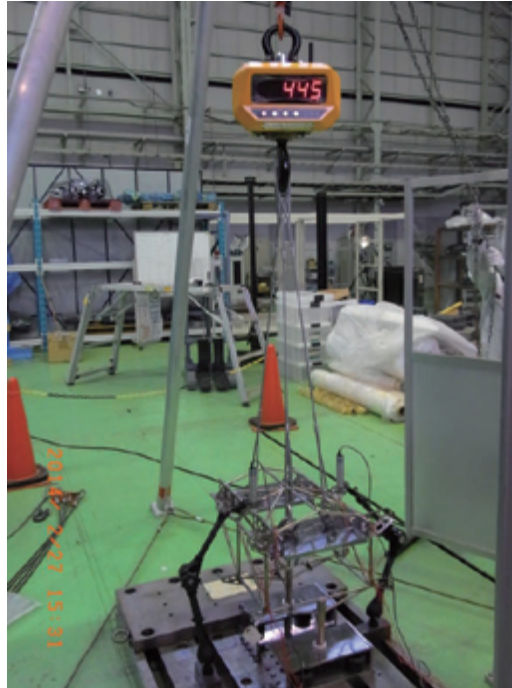


図 17 #1 供試体垂直方向 160%荷重負荷時の写真



図 18 #1 供試体垂直方向 170%荷重負荷時の写真

4.3 #2 供試体への実荷重試験(垂直方向)結果

試験手順は以下の通りとした。

1. 荷重負荷用ワイヤーが完全に緩んだ状態とし、荷重のゼロ点を設定した。
2. ひずみゲージ・変位計のバランスを実施、ゼロ点を設定した。
3. データロガーを起動、データ取得を開始した。
4. チェーンブロックにより制限荷重の40%(102.4+13.22≈116kg)以上まで負荷した。
5. チェーンブロックを緩め、荷重の読みがバッテリーポッドの自重、バッテリーの自重及び荷重負荷用ジグの重量の合計(80+13.22≈93kg)まで荷重を緩めた。
6. この時の荷重、ひずみ、変位を記録した(データ 3A)
7. 荷重を実荷重(222kg)とし、荷重、ひずみ、変位の読みを記録した(データ 3B)
8. チェーンブロックを読みが93kgになるまで緩め、荷重、ひずみ、変位の読みを記録した(データ 3C)。
9. データロガーの記録を停止した。(実荷重試験終了)

試験時のひずみデータ記録を表 2 に、実荷重負荷時の写真を図 22 に示す。最大ひずみを示した P6R の 3A データと 3B データ時の変化は 184 $\mu\epsilon$ 、同じく#1 供試体での 1A データと 1B データの間の変化は 190 $\mu\epsilon$ であった。両者の差は 6 $\mu\epsilon$ であった。#1 供試体と#2 供試体においてひずみの変化の差は非常にわずかであった。以上から、垂直方向荷重について供試体#1 と供試体#2 の同等性は確認された。

表 2 #2 供試体実荷重試験(垂直方向)結果記録

電動化航空機用ポッドフレーム強度確認試験 (垂直方向試験)
 #2供試体 実荷重試験

試験日	2014.2.27	記録者	吉村 彰記	試験時メモ
開始時刻	16:58			
室温	13.3℃			
湿度	48%	ゲージ率	2.07	

荷重 (kg)	ひずみゲージの読み (μ ε)			伸び計の読み			データレベル	備考・メモ	
	P5L	P5R	P6L	P6R	P7L	P7R			No1
目標荷重	-	-	-	-	-	-	-	-	-
115.6	115	-	-	-	-	-	-	-	-
93.2	94	100	106	-126	-132	-129	-126	0.08	0.101
221.4	222	249	252	-309	-316	-307	-305	0.228	0.185
93.2	93	104	105	-129	-132	-129	-126	0.092	0.085

合格欄 試験実施計画の合格基準に照らして 合格

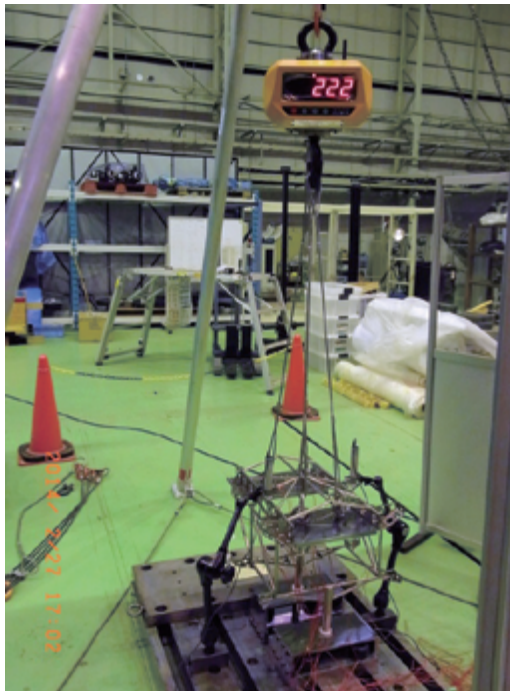


図 19 #2 供試体垂直方向実荷重負荷時の写真

4.4 #3 供試体への実荷重試験(垂直方向)結果

試験手順は以下の通りとした。なお、本試験は 2 度実施した。一度目試験では荷重に偏りがあることが疑われたため再実施した。判定は 2 回目の試験によって行った。

1. 荷重負荷用ワイヤーが完全に緩んだ状態とし、荷重のゼロ点を設定した。
2. ひずみゲージ・変位計のバランスを実施、ゼロ点を設定した。
3. データロガーを起動、データ取得を開始した。
4. チェーンブロックにより制限荷重の 40%(102.4+13.22≈116kg)以上まで負荷した。
5. チェーンブロックを緩め、荷重の読みがバッテリーポッドの自重、バッテリーの自重及び荷重負荷用ジグの重量の合計(80+13.22≈93kg)まで荷重を緩めた。
6. この時の荷重、ひずみ、変位を記録した(データ 3A)
7. 荷重を実荷重(222kg)とし、荷重、ひずみ、変位の読みを記録した(データ 3B)
8. チェーンブロックを読みが 93kg になるまで緩め、荷重、ひずみ、変位の読みを記録した(データ 3C)。
9. データロガーの記録を停止した。(実荷重試験終了)

試験時のひずみデータ記録を表 3 に、実荷重負荷時の写真を図 20 に示す。最大ひずみを示した P6R の 3A データと 3B データ時の変化は $210\mu\epsilon$ 、同じく #1 供試体での 1A データと 1B データの変化は $190\mu\epsilon$ であった。両者の差は $20\mu\epsilon$ であり、わずかであった。以上から、垂直方向荷重について供試体 #1 と供試体 #3 の同等性は確認された。



図 20 #3 供試体垂直方向実荷重負荷時の写真

表 3 #3 供試体実荷重試験(垂直方向)結果記録

電動化航空機用ポッドフレーム強度確認試験 (垂直方向試験)
#3供試体 実荷重試験

試験日	2014.2.27	記録者	吉村 彰記	試験時メモ	一回目で基準に入らなかったもの、荷重に隔りがありそうなので二回めも実施した。
開始時刻	17:51				
室温	13.5℃				
湿度	52%	ゲージ率	2.07		

荷重 (kg)	ひずみゲージの読み (μ ε)					伸び計の読み			データラベル	備考・メモ	
	P5L	P5R	P6L	P6R	P7L	P7R	No1	No2			
目標荷重											
115.6	115	-	-	-	-	-	-	-	-		
93.2	93	102	139	-142	-172	-135	-147	-0.112	0.199		
221.4	221	244	320	-335	-402	-321	-348	-0.235	0.462		
93.2	93	103	135	-141	-171	-134	-148	-0.095	0.206		
115.6	116	-	-	-	-	-	-	-	-		
93.2	93	110	113	-134	-150	-140	-140	0.03	0.092	3A	
221.4	222	262	274	-319	-360	-335	-335	0.056	0.24	3B	
93.2	93	109	113	-137	-153	-142	-143	0.035	0.095	3C	

合格欄 試験実施計画の合格基準に照らして 合格

4.5 #1 供試体への実荷重、制限荷重試験(水平方向)結果

試験手順は以下のとおりとした。

1. 荷重負荷用ワイヤーが完全に緩んだ状態とし、荷重のゼロ点を設定した。
2. ひずみゲージ・変位計のバランスを実施、ゼロ点を設定した。
3. データロガーを起動、データ取得を開始した。
4. チェーンブロックにより制限荷重(3)の 40%(48kg)以上まで負荷した。
5. チェーンブロックを緩め、荷重の読みが制限荷重(3)の 20% (24kg)まで荷重を緩めた。
6. この時の荷重、ひずみ、変位を記録した(データ 4A)
7. チェーンブロックにより荷重を実荷重条件(69kg)とし、荷重、ひずみ、変位の読みを記録した(データ 4B)
8. チェーンブロックにより荷重を負荷した。この間、制限荷重 60%、70%(72、84kg)で荷重、ひずみ、変位の読みを記録した。
9. チェーンブロックにより制限荷重(1) (85kg)まで荷重を負荷し、荷重、ひずみ、変位の読みを記録した(データ 4C)。
10. チェーンブロックにより荷重を負荷する。この間、制限荷重 90% (108kg)で荷重、ひずみ、変位の読みを記録した。
11. チェーンブロックにより制限荷重(3) (120kg)まで荷重を負荷し、荷重、ひずみ、変位の読みを記録した(データ 4E)
12. チェーンブロックを読みが 24kg になるまで緩め、荷重、ひずみ、変位の読みを記録した(データ 4F)。
13. データロガーの記録を停止した。(制限荷重試験終了)

取得したデータを表 4 に、実荷重、制限荷重(1)、制限荷重(3)を負荷した際の写真を図 21-23 に示す。データラベル 4A のデータとデータラベル 4F のデータを比較すると、ひずみの差は最大で 18 μe とわずかであり、ポッドフレーム供試体#1 は水平方向の制限荷重において有害な塑性変形を生じないことが確認できた。

表 4 #1 供試体実荷重・制限荷重試験(水平方向)結果記録

電動化航空機用ポッドフレーム強度確認試験 (水平方向試験)
#1供試体 実荷重・制限荷重試験

試験日	2014.2.28	記録者	吉村 彰記
開始時刻	16:56		
室温	19.1℃		
湿度	19%	ゲージ率	2.07

試験時メモ	
-------	--

荷重 (kg)	ひずみゲージの読み (μ ε)										伸び計の読み		データレベル	備考・メモ	
	P1L	P1R	P2L	P2R	P3L	P3R	P4L	P4R	No1	No2					
48	47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
24	24	-118	121	-97	108	-34	35	-54	52	-0.652	-0.756		4A		
69.4	69	-396	407	-326	362	-114	116	-179	177	-2.153	-2.616		4B		
72	73	-419	427	-345	379	-121	119	-190	186	-2.291	-2.677				
84	84	-489	500	-396	440	-138	140	-222	218	-2.661	-3.118				
85.3	85	-489	504	-402	446	-142	142	-223	222	-2.683	-3.221		4C		
108	108	-637	654	-518	569	-166	167	-295	288	-3.471	-4.177				
120	120	-702	721	-573	631	-186	189	-328	324	-3.946	-4.69		4E		
24	24	-133	135	-115	119	-36	31	-69	63	-0.775	-0.953		4F		

合格欄 試験実施計画の合格基準に照らして 合格

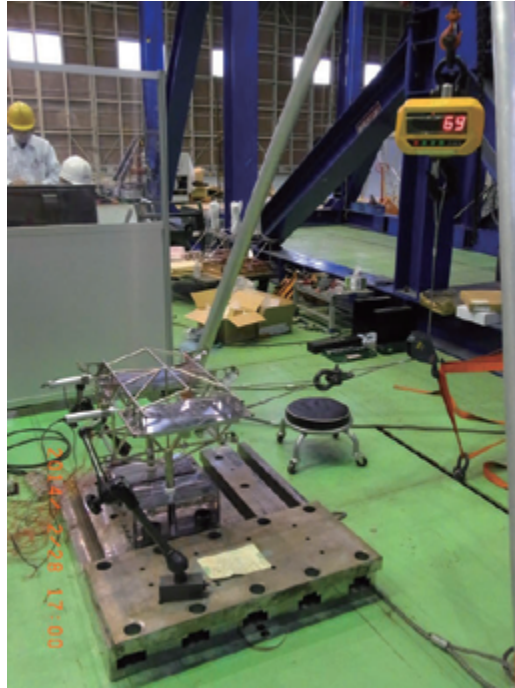


図 21 #1 供試体水平方向実荷重負荷時の写真

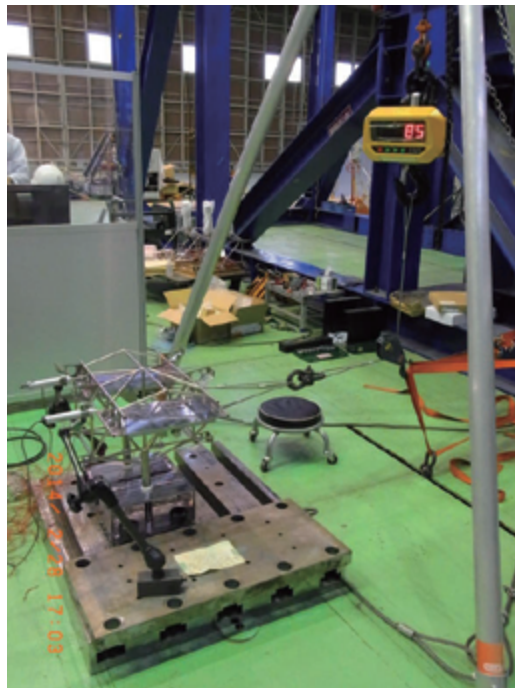


図 22 #1 供試体水平方向制限荷重(1)負荷時の写真



図 23 #1 供試体水平方向制限荷重(3)負荷時の写真

4.6 #1 供試体への終局荷重試験(水平方向)結果

試験の手順は以下のとおりとした。なお、本試験は 2 回に分けて行われた。制限荷重 130%負荷時に T スロットテーブルの横滑りが発生したため一旦除荷し、T スロットテーブルを反力床に固定した上で再度実験を実施した。判定は 2 回目の試験について行った。

1. 荷重負荷用ワイヤーが完全に緩んだ状態とし、荷重のゼロ点を設定した。
2. チェーンブロックにより制限荷重(3)の 40%(48kg)以上まで負荷した。
3. チェーンブロックを緩め、荷重の読みが制限荷重(3)の 20% (24kg)まで荷重を緩めた。
4. チェーンブロックにより荷重を終局荷重条件(1)(128kg)以上とし、3 秒間保持した。
5. 荷重を終局荷重条件(3)(180kg)以上とし、3 秒間保持した。
6. 荷重を制限荷重(3)の 160%(192kg)以上とし、3 秒間保持した。
7. 荷重を制限荷重(3)の 170%(204kg)以上とし、3 秒間保持した。
8. チェーンブロックを荷重の読みが 24kg になるまで緩めた。(終局荷重試験終了)

試験の結果、終局荷重(1)、終局荷重(3)、160%荷重、170%荷重以上の各荷重において、#1 供試体は 3 秒間破壊することはなかった。ポッドフレーム供試体#1 は水平方向の終局荷重に対して十分な強度余裕があることが確認できた。安全余裕は $204/180-1=0.13>0$ であった。終局荷重(1)、終局荷重(3)、160%荷重、170%荷重時の写真を図 24-27 にそれぞれ示す。



図 24 #1 供試体水平方向終局荷重(1)負荷時の写真

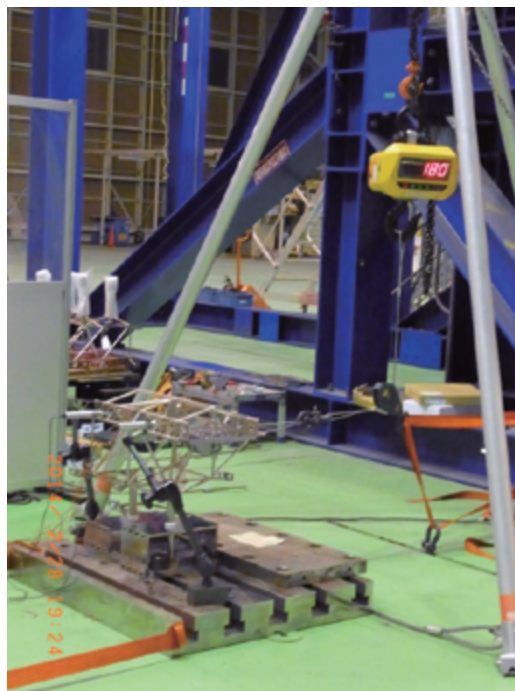


図 25 #1 供試体水平方向終局荷重(3)負荷時の写真

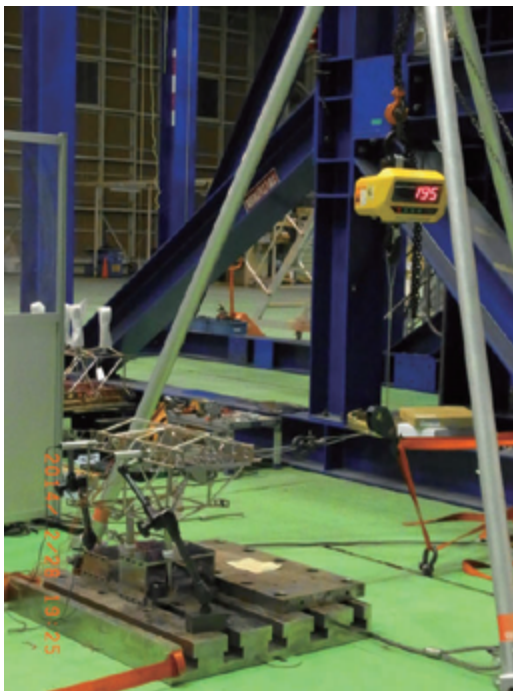


図 26 #1 供試体水平方向 160%荷重負荷時の写真

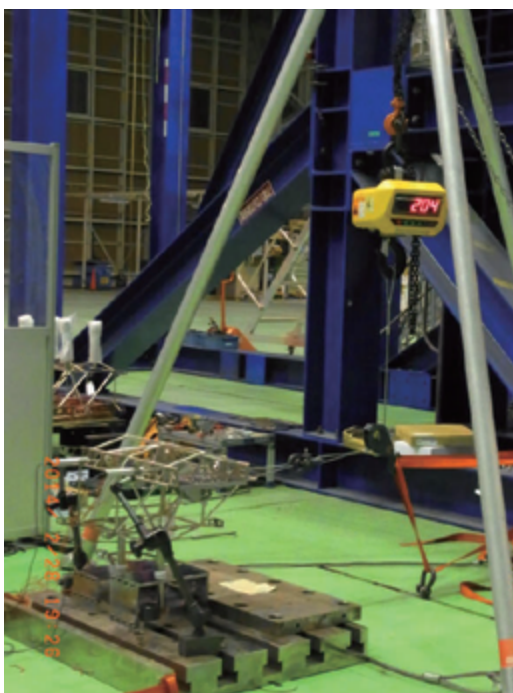


図 27 #1 供試体水平方向 170%荷重負荷時の写真

4.7 #2 供試体への実荷重試験(水平方向)結果

試験手順は以下のとおりとした。

1. 荷重負荷用ワイヤーが完全に緩んだ状態とし、荷重のゼロ点を設定した。
2. ひずみゲージ・変位計のバランスを実施、ゼロ点を設定した。
3. データロガーを起動、データ取得を開始した。
4. チェーンブロックにより制限荷重(3)の 40%(48kg)以上まで負荷した。
5. チェーンブロックを緩め、荷重の読みが制限荷重(3)の 20% (24kg)まで荷重を緩めた。
6. この時の荷重、ひずみ、変位を記録した(データ 6A)
7. チェーンブロックにより荷重を実荷重条件(69kg)とし、荷重、ひずみ、変位の読みを記録した(データ 6B)
8. チェーンブロックを読みが24kgになるまで緩め、荷重、ひずみ、変位の読みを記録した(データ 6C)。
9. データロガーの記録を停止した。(実荷重試験終了)

試験時のひずみデータ記録を表 5 に、実荷重負荷時の写真を図 28 に示す。最大ひずみを示した P3L の 6A データと 6B データ時の変化は $124\mu\epsilon$ 、同じく#1 供試体での 4A データと 4B データの変化は $80\mu\epsilon$ であった。両者の差は $44\mu\epsilon$ とわずかであった。以上から、水平方向荷重について供試体#1 と供試体#2 の同等性は確認された。

表 5 #2 供試体実荷重試験(水平方向)結果記録

電動化航空機用ポッドフレーム強度確認試験 (水平方向試験)
#2供試体 実荷重試験

試験日	2014.2.28
開始時刻	14:56
室温	19.8℃
湿度	32%
ゲージ率	2.07

記録者	吉村 彰記	試験時メモ
-----	-------	-------

荷重 (kg)	ひずみゲージの読み (με)				伸び計の読み		データラベル	備考・メモ
	P3L	P3R	P4L	P4R	No1	No2		
目標荷重	49	-	-	-	-	-		
48	49	-	-	-	-	-		
24	25	-90	87	-53	43	-1.273	6A	-1.535
69.4	69	-214	205	-161	155	-3.128	6B	-3.638
24	24	-89	82	-55	40	-1.282	6C	-1.556

合格欄 試験実施計画の合格基準に照らして 合格



図 28 #2 供試体水平方向実荷重負荷時の写真

4.8 #3 供試体への実荷重試験(水平方向)結果

試験手順は以下のとおりとした。本試験では、最初に 24kg まで除荷した際にデータの記録し忘れが生じたため一旦除荷し、再度実験を実施した。評価は 2 回目の試験に対して実施した。

1. 荷重負荷用ワイヤーが完全に緩んだ状態とし、荷重のゼロ点を設定した。
2. ひずみゲージ・変位計のバランスを実施、ゼロ点を設定した。
3. データロガーを起動、データ取得を開始した。
4. チェーンブロックにより制限荷重(3)の 40%(48kg)以上まで負荷した。
5. チェーンブロックを緩め、荷重の読みが制限荷重(3)の 20% (24kg)まで荷重を緩めた。
6. この時の荷重、ひずみ、変位を記録した(データ 6A)
7. チェーンブロックにより荷重を実荷重条件(69kg)とし、荷重、ひずみ、変位の読みを記録した(データ 6B)
8. チェーンブロックを読みが 24kg になるまで緩め、荷重、ひずみ、変位の読みを記録した(データ 6C)。
9. データロガーの記録を停止した。(実荷重試験終了)

試験時のひずみデータ記録を表 6 に、実荷重負荷時の写真を図 29 に示す。最大ひずみを示した P4R の 6A データと 6B データ時の変化は $116\mu\epsilon$ 、同じく #1 供試体での 4A データと 4B データの変化は $125\mu\epsilon$ であった。両者の差は $9\mu\epsilon$ とごくわずかであった。以上から、水平方向荷重について供試体 #1 と供試体 #3 の同等性は確認された。

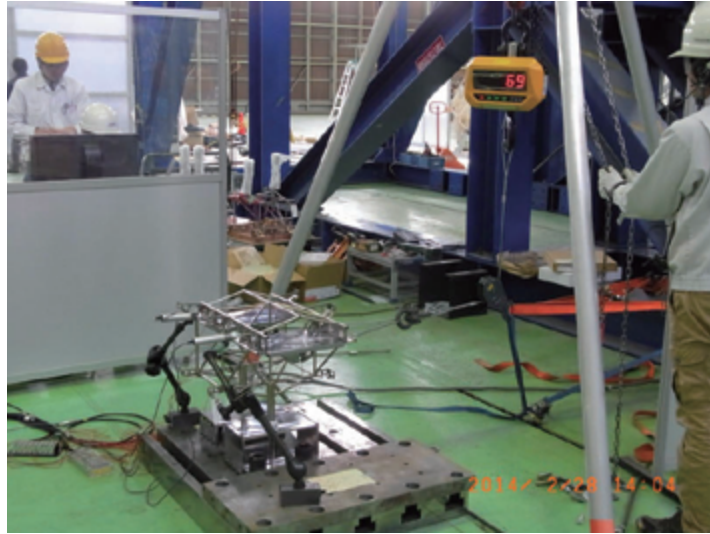


図 29 #3 供試体水平方向実荷重負荷時の写真

表 6 #3 供試体実荷重試験(水平方向)結果記録

電動化航空機用ボッドフレーム強度確認試験 (水平方向試験)
 #3供試体 実荷重試験

試験日	2014.2.28	記録者	吉村 彰記	試験時メモ 一回目の24kgは変位計の読みを忘れたため、再度24kgの測定を実施。
開始時刻	14:00	試験時間		
室温	19.8°C	試験速度		
湿度	37%	ゲージ率	2.07	

目標荷重	荷重 (kg)	ひずみゲージの読み (μ ε)			伸び計の読み		データラベル	備考・メモ
		P3L	P3R	P4L	P4R	No1		
	48	47	-	-	-	-	-	-
	24	24	-48	48	-51	50	-	-
	24	24	-50	43	-52	47	-0.72	6A
	69.4	69	-153	147	-157	163	-2.235	6B
	24	25	-51	49	-55	58	-0.8	6C

合格欄 試験実施計画の合格基準に照らして 合格

4. 結 言

本報告は電動航空機飛行実証試験に際し、バッテリーを搭載するポッドフレームが所定の強度を有しているかを確認する目的で実施された、電動航空機用ポッドフレーム強度確認試験の実施結果について報告した。本実験ではポッドフレーム供試体3点に対して試験を実施した。ポッドフレーム供試体#1に対しては実荷重試験・終局荷重試験を垂直方向・水平方向の荷重のそれぞれに対して実施した。一方、ポッドフレーム供試体#2、#3に対してはポッドフレーム#1との同等性を確認するため、垂直方向・水平方向の実荷重試験のみを実施した。実験の結果、ポッドフレーム供試体#1は垂直方向・水平方向の制限荷重において有害な塑性変形を生じないことが確認できた。また、ポッドフレーム供試体#1は垂直方向・水平方向の終局荷重に対して十分な強度余裕を有することがわかった。ポッドフレーム#2、#3は垂直方向、水平方向ともにポッドフレーム#1と変形の同等性が確認された。

謝辞

本研究に関わる各種実験を補助していただきました(株)IHI ジェットサービス 山田 明弘氏に感謝申し上げます。また、東京大学の連携大学院生伊井 慎悟氏には実験をお手伝いいただきました。ここに感謝を申し上げます。本事業にて製作した供試体は(株)東京 R&D に製作していただきました。関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 西沢ら、「航空機用電動推進システム技術の飛行実証 (FEATHER 事業)」、JAXA 航空シンポジウム 2014、2014年9月18日、<http://www.aero.jaxa.jp/publication/event/pdf/event140918/poster07.pdf>

