

人力飛行機用炭素繊維強化プラスチックの強度

岡部 徳之¹・中村 俊一郎²

¹ 第一工業大学 学部学生 航空宇宙工学科

² 第一工業大学 客員教授 航空工学科

(〒899-4395 鹿児島県霧島市国分中央 1-10-2)

E-mail: s-nakamura@daiichi-koudai.ac.jp

Strength of CFRP laminates for Human-powered Airplane

Toshiyuki Okabe¹, Shunichiro Nakamura²

¹ Undergraduate, ² Guest Professor,

Dept. of Aeronautics Eng., Daiichi Univ. Institute of Technology
(Kokubu-Chuo 1-10-2, Kirishima-shi, Kagoshima-ken 899-4395, Japan)

E-mail: s-nakamura@daiichi-koudai.ac.jp

In the design of the human-powered airplane, the design of beams for wing spar and fuselage are important from the perspective of flight safety. Recently, pipes made with carbon fiber reinforced plastics (CFRPs) are used for the beams. Usually these beams have each CFRP laminate with different lamina-layups according to their individual strength requirement.

In this report, three types of laminates were tested to obtain their tensile and bearing strengths. As a result of this study, each laminate has different strength according to the layups.

Key Words: human-powered airplane, laminate layup, tensile and bearing strengths.

1. はじめに

近年、軽くて強い炭素繊維強化プラスチック (CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastics) の重要性がますます増してきている。開発されてからまだ百年あまりの材料であり、繊維方向の組み合わせにより様々な力に対応することができる。材料により強度が異なり、また形状が同じでも積層構成により異なる強度を持つため異なった部材を設計できる。そのため強度に関する試験データはそれぞれの部材毎に取得することが望まれる。

本大学では、航空機設計研究部が製作する人力飛行機の主な構造材料としてCFRPを多く採用している。しかし、飛行試験中に構造の一部が破損してしまうことがあった。事例としては、CFRPパイプ製主翼桁の曲げ破損、CFRPパイプ製ドライブシャフ

トの面圧破損がある。ドライブシャフトはパイロットがペダルを漕ぐことにより生じる軸トルクをプロペラに伝達する役目をしている。ドライブシャフトの両端は接着およびピンを併用して金属の軸と結合されている。飛行試験ではCFRPパイプにあげたピン孔が図1に示すように面圧破損した。原因を調べたところ、接着が不十分であったこともあり、破損部分に使用されていたCFRPパイプのピン孔面圧強度が不足していることが判明した。

そこで、本研究では破損部に使用されていたCFRPパイプと同じ積層構成を持つ試験片の強度データを取得することにより精度のある設計につなげることにした。データとしては基本となる引張強度および面圧強度を取得した。さらにこれらのデータからCFRPの強度特性を考察した。



図1：ドライブシャフトピン孔の面圧破損

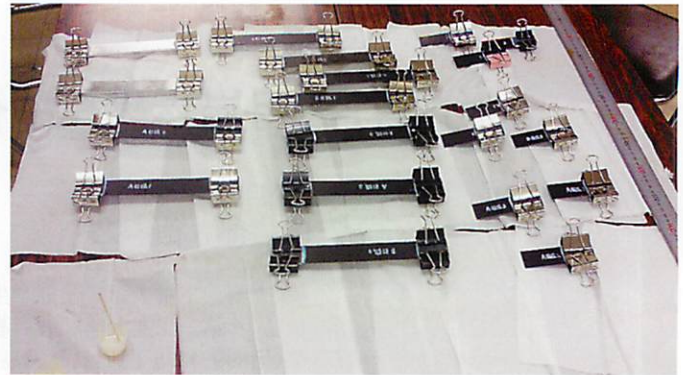


図2：試験片の概要

2. 強度試験

2.1 試験片の準備

試験片は表1に示すようにA、B、C3種類を各3本用意する。使用するプリプレグは表2に示すように90°層が東レ材、±45°、0°層が三菱レイヨン材である。製造は有限会社スリーホープで行った。

表1：試験片積層構成および厚さ

試験片	積層構成	厚さ(mm)
A	[90°/45° ₂ /-45° ₂ /0° ₄ /90°]	1.138
B	[90°/45°/-45°/0° ₄ /90°]	0.916
C	[90°/45°/-45°/0°] _s	0.916

表2：使用プリプレグ

厚さ(mm)	積層方向	社名	炭素繊維	樹脂
0.125	90°	東レ	T-700	エポキシ #2592
0.111	±45°、0°	三菱レイヨン	HR	エポキシ #350

引張強度試験片の大きさは、長さ200mm、幅25mmである。面圧強度試験片の大きさは、長さ80mm、幅25mmである。試験機で試験片をつかむ部分はGFRPタブを接着して補強した。タブは長さ35mm、幅25mm、厚み1mmであり、接着は常温硬化型エポキシ系接着剤EP-34Bで行った。引張強度試験片は両端の裏表に、面圧強度試験片は片端の裏表に接着した。図2に試験片の概要を示す。左側2列が引張強度試

験片(TA、TB、TC試験片と称す)、右側1列が面圧強度試験片(BA、BB、BC試験片と称す)である。それぞれの試験片にGFRPタブを取り、クリップで圧着している状態を示す。左下は硬化状態を確認するための接着剤である。

2.2 引張強度試験

(1) ひずみゲージの貼付

準備した引張強度試験片の裏表中央にひずみゲージを貼付する。

(2) 試験準備

試験機は鹿児島高等専門学校所有の(株)東京試験機YU-2000を使用した。試験片を試験機上下のクロスヘッド間にオフセットのないようにセットし、上部つかみ部を油圧チャックで固定し、荷重およびストロークをゼロにリセットする。続いて、下部つかみ部を油圧チャックで固定する。

(3) 試験実施

試験機により引張荷重を試験片が破断するまで負荷する。クロスヘッド速度は1mm/分であり、室温で実施する。負荷している間のクロスヘッド変位、負荷荷重およびひずみを計測する。荷重およびクロスヘッド速度は試験機をコントロールするコンピュータに記録する。ひずみはセンサーインターフェイスPCD-300Aを介してパソコンに記録する。図3に破断した引張強度試験片を示す。

(4) 試験結果

負荷途中から、パキッやパリッといった音を数回発し、破裂音とともに試験片は破断した。

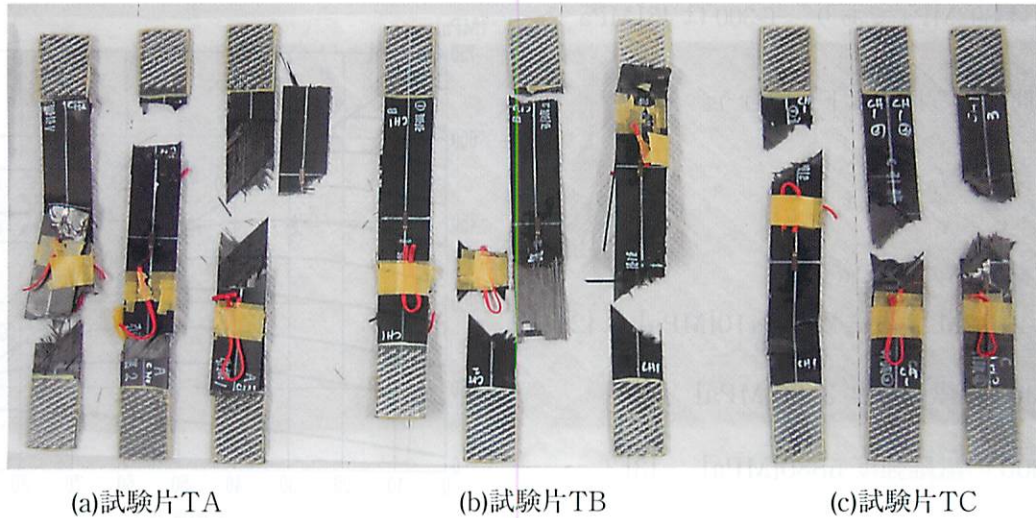


図3 引張強度試験片

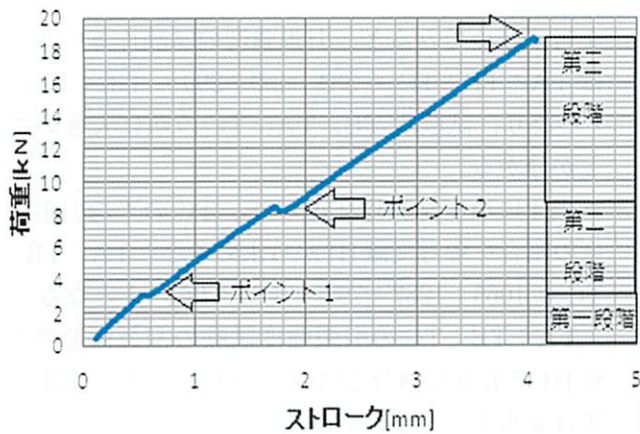


図4：荷重-ストローク線図（試験片TC-1）

図4は引張強度試験で得られた試験片 TC-1 の負荷荷重とクロスヘッド変位との関係を示す。同図により、ストローク増に従い、ほぼ線形に荷重増が見られ（第一段階）、破断荷重の約16%で荷重が増加せずにストロークが増加する点がある（ポイント1）。その後、ストローク増に対し第一段階より小さい傾きでほぼ線形に荷重増が続き（第二段階）、破断荷重の約46%で再び荷重が増加せずにストロークが増加する点がある（ポイント2）。その後、第二段階よりさらに小さい傾きでほぼ線形にストローク増に対して荷重増が続き（第三段階）、破断に至っている。試験片 TA、TB の引張強度試験結果も同様の傾向が見られた。ただし、ポイント1は約10%、ポイント2は約30%である。

表3に試験結果を示す。ヤング率は第二段階の傾きとして求めた。

表3：CFRP 試験片 - 引張強度試験結果

試験片No.	荷重 P	ストローク	応力 σ	ヤング率 E
	kN	mm	MPa	GPa
TA-1	30.6	5.43	1076	40
TA-2	30.3	5.38	1065	40
TA-3	30.0	5.39	1055	38
TAの平均	30.3	5.40	1065	40
TB-1	29.0	5.06	1266	52
TB-2	30.0	5.28	1310	51
TB-3	29.4	5.48	1284	50
TBの平均	29.5	5.27	1287	51
TC-1	18.7	4.07	817	45
TC-2	18.4	3.95	804	45
TC-3	17.7	4.11	773	46
TCの平均	18.3	4.04	798	45

(5) 考察

a. 公開データとの比較

CFRPは積層構成により非対称積層材、疑似等方性積層材などがある。3種類の試験片のうち、試験片 TC のみが疑似等方性積層材である。試験片 TC について推算値との強度比較を行う。

使用したプリプレグのデータがないため、 0° 層および $\pm 45^\circ$ 層に使われている三菱レイヨン HR40 12M の繊維強度を用いて、東レ T-800 と T-300 を使用した疑似等方性積層材の強度データおよび繊維強度を使い、線形補間法により TC 試験片の引張強度を推算する。

資料 [1] によると T-800 の疑似等方性積層材の

引張強度は 892MPa であり、T-300 は 451MPa である。

線形補間による推算は下式で行う。

$$P = f_0 + \frac{f_1 - f_0}{x_1 - x_0} (x - x_0)$$

P を TC 試験片の推算値

x を HR40 12M の繊維強度 4410[MPa] [2]

x_0 を T-300 の繊維強度 3530[MPa] [3]

x_1 を T-800 の繊維強度 5880[MPa] [3]

f_0 を T-300 疑似等方性積層材の引張強度

f_1 を T-800 疑似等方性積層材の引張強度

$$P = 451 + \frac{892 - 451}{5880 - 3530} (4410 - 3530)$$

$$= 616[\text{MPa}]$$

試験結果は 798MPa であるから、推算値より 30% 高めである。この違いは繊維強度が下限値となっていることによる可能性がある。

b. 積層の違いによる引張強度

まず、各試験片の繊維方向の割合を以下に示す。

表 4：試験片毎の各層の比率

積層方向	積層比率		
	0°	±45°	90°
試験片TA	4層	4層	2層
	40%	40%	20%
試験片TB	2層	2層	2層
	50%	25%	25%
試験片TC	2層	4層	2層
	25%	50%	25%

各層の比率による引張強度 [1] を図 5 に示す。同図は疑似等方性積層材の引張強度が 290MPa の場合である。同図に試験片 A、B、C の積層比率

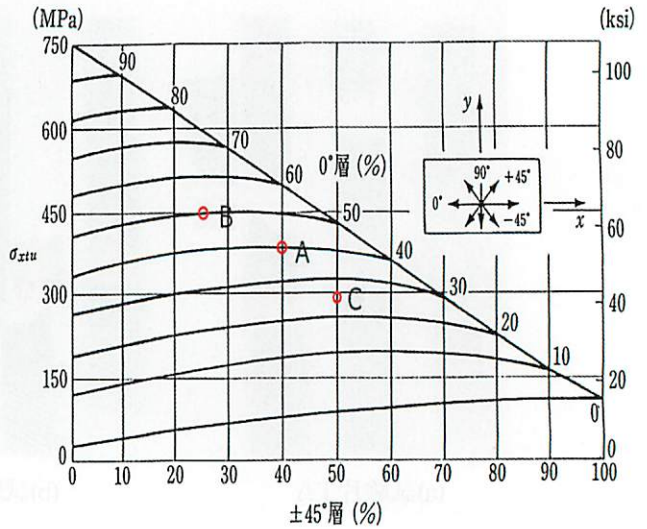


図 5：各層の比率による引張強度[1]

を当てはめてみると、引張強度の試験片毎の割合は TA : TB : TC = 384 : 450 : 290 = 1.32 : 1.55 : 1 となり、試験片 TB、TA、TC の順に大きいことが分かる。

表 4 に示す試験片 TA、TB、TC の平均引張強度の割合を参考文献 [1] から求めると TA : TB : TC = 1065 : 1287 : 798 = 1.34 : 1.61 : 1 となる。

TA : TB : TC の引張強度試験の割合は参考文献 [1] で求めた割合とほぼ一致しており、試験結果は妥当なことがわかる。

2.3 面圧強度試験

(1) 試験準備

a. ロードセル (LC) 相当のアルミニウム引張試験片の準備

面圧強度試験は手動で行うことにし、負荷荷重を計測する道具を準備する。荷重を検出し、電気信号に変換する荷重変換機を使用すれば計測可能であるが、所有する LC の最大許容荷重が 500N のため、LC に代わる荷重計を準備する。

万能試験機 (丸東製作所 MBU30T21003) を使用して、アルミニウム試験片に引張荷重を加え、貼付したひずみゲージの出力を測定する。これらのデータを整理して、図 6 に示すアルミニウム試験片の荷重 - ひずみ線図を作り、これを荷重計 (LCAL) とし、本番の試験はこの LCAL を用いて荷重を測定した。

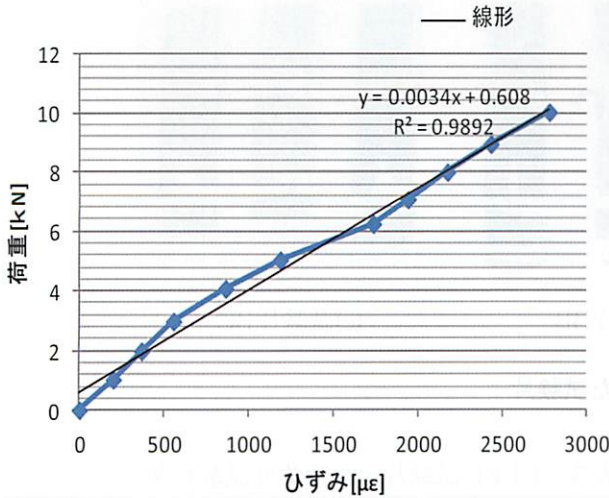


図6：LCALの荷重 - ひずみ線図

図6から読み取れるように荷重はひずみに対して下式となる。

$$y (\text{荷重}) = 0.0034 x (\text{ひずみ}) + 0.608$$

これを0点補正し下式を得る。

$$y (\text{荷重}) = 0.0034 x (\text{ひずみ})$$

この式より、面圧強度試験時に加わる荷重が計算される。

b. 面圧強度試験片にボルトを介して荷重を負荷するための準備をする。図7に試験治具組立の全体図および試験片の取り付けを示す。

ア、試験治具として、厚み1mmのアルミニウム板から35mm×25mmの小片を9枚と、厚み3mmのアルミニウム板から100mm×25mmの小片18枚を足踏みシャーリングにより切り出し、バリ取りをして表面をアセトンで拭く。切り出した1mm厚のアルミニウム小板を3mm厚のアルミニウム小板2枚ではさみ、メタルロックで貼り合わせて面圧試験治具とする。

イ、面圧強度試験片のGFRPタブがない側の端から15mmの中央位置と、試験治具の貼り合わせのない側の端から10mmの中央位置を合わせる。両者を合わせた中央位置に直径5mmの通し孔をあける。通し孔はまず直径4.8mmのドリル孔をあけ、次に直径5mmのリーマで仕上げた。ドリルの回転数は1200rpmとした[4]。ここで面圧強度試験片にあけた孔が試験の対象となる。面圧試験治具の孔周りにはバリ取りを行った。面圧強度試験片と面圧試験治具の通し孔にボルトを差し込み、ナットをフィンガータイトで締め、両者の面の摩擦で荷重

が伝達しないようにした。

ウ、LCALと面圧強度試験片、および面圧試験治具と変位負荷用ワイヤを結合するアルミニウム板を、ボルト結合して枠組みの中にセットする。変位負荷用ワイヤは固定した小型パンタグラフジャッキの可動部に取り付け荷重準備を完了する。図7に試験治具の組み立てを示す。



(a)全体図

(b)試験片の取り付け

図7：試験治具の組み立て

エ、面圧強度試験片に貼付したひずみゲージのリード線をセンサーインターフェイスPCD-300Aに接続し、これとパソコンをつなぎ、計測準備を完了する。

(2) 試験実施

面圧強度試験はジャッキの可動部を手動で下方に動かすことにより試験片に変位を加え負荷する。室温状態で破断するまで負荷し、この間の試験片およびLCALのひずみを計測する。

試験は手動で行ったため、直に負荷している手ごたえが感じられ、ジャッキを動かすのにだんだん大きな力が必要となるのがわかる。試験初期からズリズリあるいはパリパリといった試験片の割れや引き裂かれるような音が発生した。破断時には試験片自体からの音はあまりせず、いきなりジャッキに加わる力が抜け、面圧試験治具とともに破断した試験片の一部が落下した。図8に破断した試験片を示す。

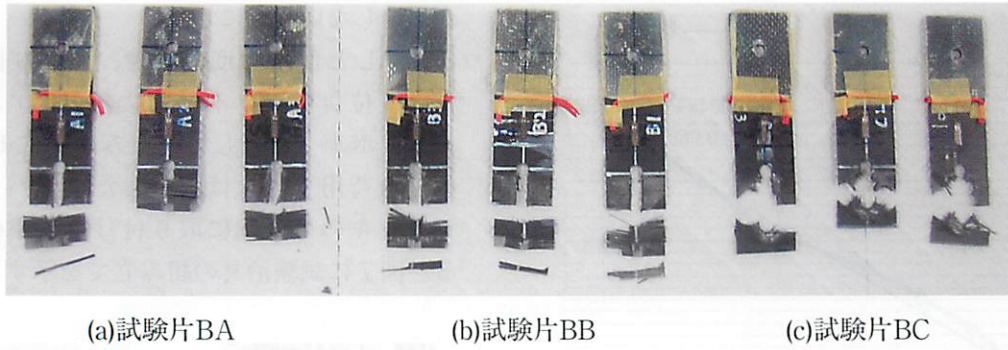


図8 破断した試験片

(3) 試験結果

図9に面圧強度試験で得られた試験片 BA-1 の負荷荷重とひずみ値との関係を示す。同図によりひずみが増加するに従い、最大荷重の48%にあたるポイント1までは、ほぼ線形に荷重-ひずみが増加する。ポイント1で同じ荷重のままひずみが増大している。その後、最大荷重の95%にあたるポイント2まで荷重-ひずみの増加が続く。ポイント2では荷重が減少すると共にひずみが大きく減少する。その後また、ほぼ線形に荷重-ひずみが増加し、最終破断に至っている。試験片 BB、BC の面圧試験結果も同様の傾向が見られた。ただし、試験片 BB のポイント1は63%、ポイント2は最終破断、試験片 BC のポイント1は約65%、ポイント2は約85%で見られた。

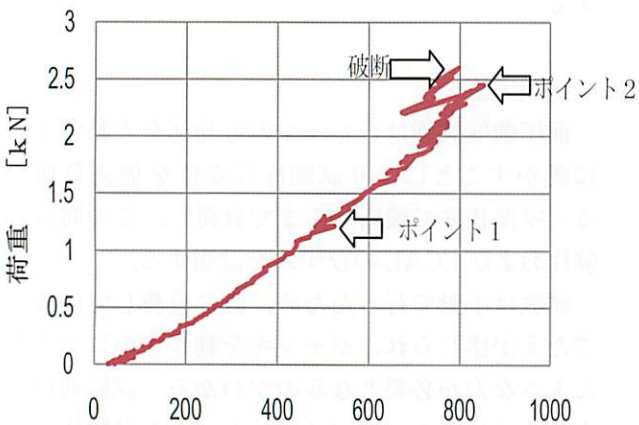


図9：面圧強度試験BA-1荷重-ひずみ

表5に試験結果を示す。応力はボルト孔の平均面圧応力である。

表5：CFRP 試験片 - 面圧強度試験結果

試験片No.	荷重 P	ひずみ ϵ	面圧応力 σ
	kN	10^{-6}	MPa
BA-1	2.60	798	455
BA-2	2.47	838	435
BA-3	2.51	556	440
BA 平均	2.53	818	445
BB-1	1.88	750	410
BB-2	1.71	718	375
BB-3	2.86	1118	625
BB 平均	2.15	862	470
BC-1	2.91	1730	635
BC-2	2.76	1418	605
BC-3	3.43	1943	750
BC 平均	3.03	1697	665

(4) 考察

表5に示す通り、試験片 BC の破断時の面圧強度が最も高い。これは試験片 BC の45°層の割合が50%と最も多く、そのため面圧強度が大きくなったと考えられる。ただし、試験片 BA も45°層が40%と多い割合にも関わらず、試験片 BC の値と差が開いたことについては、積層構成が試験片 BC は板厚方向に対し対称であるか、試験片 BA は非対称であることによる影響と考えられる。試験片 BB-3 はあとの2本の試験片より高い面圧強度を示しているが、原因を突き止めるまでに至っていない。

図9で示した試験結果は、裏表に貼付したひずみゲージから得られる計測値の平均と荷重値の図である。これをチャンネル (CH) 別を示すと図10となる。

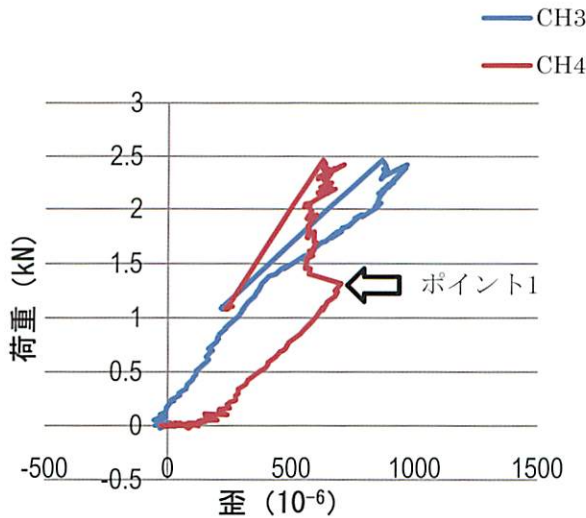


図10：BA-2のチャンネル別ひずみ

CH4が45°層に近い面、CH3が0°層に近い面である。同じ荷重に対しCH4側のひずみは大きく、ポイント1からはそれ以上ひずみの増加がなくなり荷重のみが増加する。CH3側はポイント1から荷重の増加に対しひずみの増加量が大きくなり最大荷重まで至っている。この現象の解明にはCH3側とCH4側の剛性の違いによる荷重の分担、試験片に働く曲げおよび各層ごとの破損を考慮して解析する必要がある。

この現象は、図11に示す対称積層のBC-2試験片では顕著に見られない。

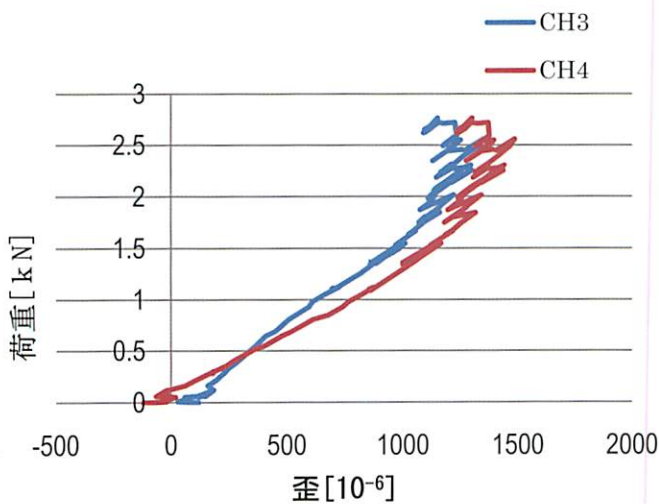


図11：BC-2のチャンネル別ひずみ

3. まとめ

積層構成の異なる3種類のCFRP試験片について引張強度試験および面圧強度試験を行ってデータを得ることができた。これらの結果は今後製作する人力飛行機の設計に活用できると考えている。

この試験は佐藤亮介の第一工業大学平成22年度卒業論文「CFRPの強度試験」を引き継いで行った。引張試験の実施においては鹿児島工業高等専門学校山下俊一氏および油田功二氏に御指導いただき本当にありがとうございます。

参考文献

- [1] 小林繁夫、航空機構造力学、平成4年、東京、丸善
- [2] 三菱レイヨン HP www.mrc.co.jp/pyrofil/product/index.html
- [3] 東レ(株) HP www.torayca.com/download/pdf/torayca.pdf
- [4] 鈴木節男、難加工材の切削・研削・ドリル加工、1990、神戸、海文堂書店