

令和3年度大阪大学未来基金「学部学生による自主研究奨励事業」研究成果報告書

ふりがな氏	たなかしょうた 田中翔大	学部 学科	工学部 応用理工学科	学年	3 年				
ふりがな 共 同 研究者氏名	よしだあや 吉田 絢	学部 学科	工学部 応用理工学科	学年	2 年				
	やまだまこ 山田 眞子		工学部 応用理工学科		2 年				
	たかみゆりこ 高見優梨子		工学部 応用理工学科		2 年				
	ふじもとあきひと 藤本 彬人		工学部 応用理工学科		2 年				
アドバイザー教員 氏名	尾崎 雅則	所属	工学研究科 電気電子情報通信工学専攻						
研究課題名	翼剛性改善に及ぼす翼端リブのカーボנקロスによる補強の有効性の検討								
研究成果の概要	研究目的、研究計画、研究方法、研究経過、研究成果等について記述すること。必要に応じて用紙を追加してもよい。（先行する研究を引用する場合は、「阪大生のためのアカデミックライティング入門」に従い、盗作剽窃にならないように引用部分を明示し文末に参考文献リストをつけること。）								

1. はじめに

私たちは大阪大学飛行機制作研究会に所属しており、毎年前年度の反省点を踏まえて設計・製作に改善を加えながら無尾翼の人力飛行機を製作している。本年度の学生実験では、機体が設計通りの性能を得るために翼の剛性や設計形状の再現性の向上を目指して、翼端リブの補強法の模索及びその確認を行った。

2. 本実験の動機及び目的

人力飛行機において、機体、特にその中でも翼の剛性を確保することは安全性及び機能性の観点から非常に重要である。ここでいう翼の剛性として挙げられるのは翼の骨（CFRP パイプ）もしくは、翼リブの2つである。現在、飛行機の翼は軽量化と最低限の強度を目的とし、バルサ材とスタイロフォームで構成されている。これらは変形しやすく強度が低いが、翼型の形を保つために翼を構成するリブ全てに補強を施すのは使用するカーボンの重量及びコストの点において問題が発生する。

そこで、軽量化と低コストを両立しつつ効率よく翼の剛性を確保するために翼端リブのみにカーボンクロスで補強を施し、それがもたらす翼剛性の改善を検討した。

以後、カーボンクロスで補強を施した翼端リブをカーボンリブと呼称する。

3. カーボンリブの製作法の模索

カーボンリブを製作するにあたって、次の要素を考えた。

- ・どの位置に補強を施すべきか
- ・どの種類の強さに対して補強を考えるべきか。
- ・製作にかかる労力が大きすぎないか。
- ・製作に対するコストが莫大ではないか。

それぞれの要素について、次のような結論を出し、製作に取り組んだ。

①どの位置に補強を施すべきか

応力集中が発生しそうな位置、もしくは全体に補強を施すかで考え、結論としては全体に補強を施す事にした。

具体的には、翼は桁という CFRP パイプを通す穴を設けるため、平板の円孔応力集中と同様な問題として応力集中が翼穴の上下に発生すると考え、そこにのみ補強を施すかどうかを考えたが、カーボンリブにして補強を施した時に補強分の重量が増えるため、翼の接合時のための機能もこのカーボンリブに与えて、これまで接合の機能を与えていた部材を取っ払う事でその重量の採算を取らなければその功利が少なくなってしまう。そのため、全体に補強を施して強度を高めることにした。

②どの種類の強さに対して補強を考えるべきか

曲げに強く着目した。

曲げ及びカーボンパイプとの接着部のねじれの2つに対する対策を考えたが、特に曲げに対する強度というのはリブに固有のものであるが、捻じれに関しては解析から得られる風圧中心が一般的に翼弦長の25%近傍に存在するものという経験的結果より、工夫を施せばリブ以外で改善できる要素でもあるため、強くは見ない事とした。

③製作にかかる労力が大きすぎないか

なるべく、普段の作業に支障が出ないようにと考え、また今回の実験は変化の確認という事もあったので、カーボクロス一枚をエポキシ性の接着剤を用いて接着することとした。

④製作に対するコストが莫大にならないか

カーボクロスは非常に高価である。また、繊維方向には切れやすい事もあった製作中に何度もミスが発生した。これに関しては避けようのないコストであるため、これを除けば特に目立って高額なものはカーボクロス以外には見当たらなかった。

また、強度の試験をするにあたってその比較をなるべく対照にしたかったため、工作に CNC(Computerized Numerical Control)の機械を導入した。

この機械の組立は我々が行ったため精度が不安である。その組立によって生じる製作誤差を測定し、その製作精度を評価する。結論から言えば、手で切る場合は 1mm の誤差を最終的には許容しており、CNC の方が精度良く切れるので導入は問題なかった。

MDF 板を $100 \times 100[\text{mm}^2]$ に彫ってもらい、その時に発生したズレを X=0,50,100 地点での Y 方向のズレ、Y=0 地点での X 方向のズレをそれぞれ 5 回ノギスで計測した。

本実験の主目的ではないためあまり詳細にはこの結果を伝えないが、計測値、真値との差(100・計測値)とその他統計的数値、その結果評価された誤差の結論をそれぞれ表 1～表 3 に示す。

表 1 測定値

測定値					
X方向ズレ	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目
0	100.60	100.40	100.45	100.50	100.49
50	100.46	100.35	100.45	100.50	100.58
100	100.60	100.40	100.40	100.65	100.73
Y方向ズレ	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目
0	100.05	99.90	99.90	99.20	99.44
50	100.12	99.90	99.90	99.55	99.45
100	100.19	100.05	100.05	99.55	99.37

表 2 各統計的値¹

		標本数	t分布の95%点						
測定値-真値(100)		5	2.571						
X方向ズレ	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	標本平均	不偏分散	標準偏差	95%信頼区間
0	0.60	0.40	0.45	0.50	0.49	0.49	5.47.E-03	7.40.E-02	0.10
50	0.46	0.35	0.45	0.50	0.58	0.47	6.97.E-03	8.35.E-02	0.11
100	0.60	0.40	0.40	0.65	0.73	0.56	2.24.E-02	1.50.E-01	0.19
Y方向ズレ	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	標本平均	不偏分散	標準偏差	95%信頼区間
0	-0.05	0.1	0.1	0.8	0.56	0.30	1.30.E-01	3.61.E-01	0.46
50	-0.12	0.1	0.1	0.45	0.55	0.22	7.65.E-02	2.77.E-01	0.36
100	-0.19	-0.05	-0.05	0.45	0.63	0.16	1.29.E-01	3.59.E-01	0.46

表 3 t 分布より求めた誤差

X方向ズレ	上側誤差	標本平均	下側誤差
0	100.58	100.49	100.39
50	100.58	100.47	100.36
100	100.75	100.56	100.36
Y方向ズレ	上側誤差	標本平均	下側誤差
0	100.77	100.30	99.84
50	100.57	100.22	99.86
100	100.62	100.16	99.70

これら表から結論的には上記のように問題がないという結果になった。この場合問題になるのはズレがある事ではなく、そのズレが Y=0 地点と Y=100 地点で大きく違うかであるため、特に X 方向ズレは極めて小さいと言える。

CNC は大体 3 分程で一つのリブを完成させる。手切りでは早くて一つ作るのに 60 分はかかると思われることから、効率の面でも製作方法として導入のリターンは大きい。

カーボンリブは三通りを用意した。

- ・これまで使用してきたバルサ材でスタイロフォームをサンドしただけの翼端リブ
 - ・スタイロフォームをカーボクロスでサンドした翼端リブ
 - ・バルサ材にカーボクロスを貼り付けてスタイロフォームをサンドした翼端リブ
- 3 つ目が我々が採用を検討しているものである。



図 1 上:バルサリブ 中:カーボンだけのリブ 下:バルサ+カーボンリブ

カーボクロスの接着は高粘度エポキシ性接着剤を使用した。接着後はエポキシ自身も高い剛性を持ち、かつ接着力も強力だからである。

製作方法は、

- ①使用するカーボクロスの 2 倍の質量のエポキシ接着剤を用意し、カーボクロスに塗り込む。
- ②カーボクロスを翼端リブに貼り付けて、ピールクロスで包む。
- ③さらにその上から綿状の布で包み、ゴミ袋を断熱目的で被せて 1 時間ほどドライヤーで温める。
- ④1 時間したらゴミ袋を外し、1 日置く。
- ⑤固まっている事を確認し、包んだ布を丁寧に外す

なお、キムワイプがピールクロスの代替にならないかを試してみたが、剥がす途中で破れてしまい、全く使い物にならなかった。

このようにして製作方法は確立できた。

4. 強度試験

強度試験として、2 つの荷重試験を行った。

①点荷重での曲げ試験

②点荷重でのねじれ試験

具体的にその手法を説明する。

まず、曲げ試験、ねじれ試験ともに、荷重を負荷した点は次の図2の点である。

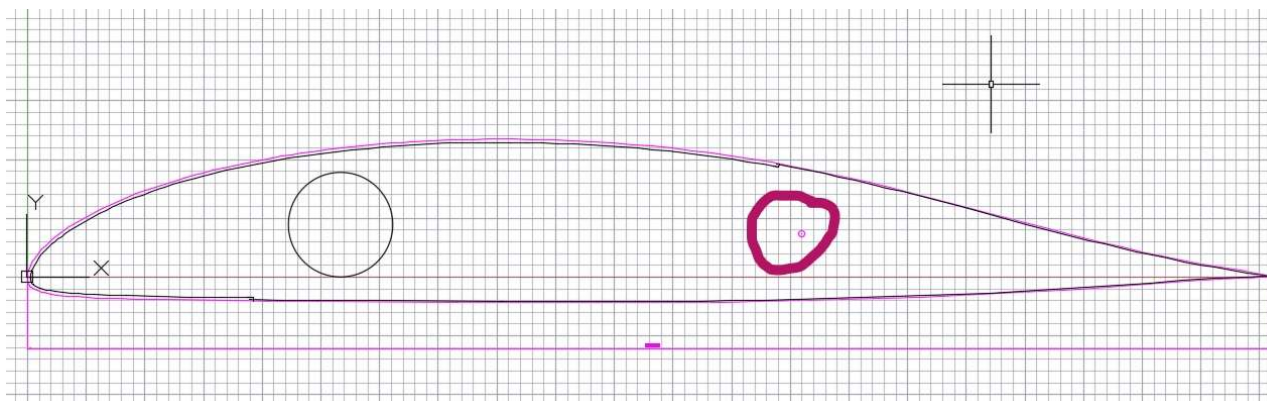


図2 荷重負荷点 赤丸で囲んでいる

この XY 座標は前縁から後縁を直線でつないだ方向を x の方向とし、原点は前縁に設置してある。

この点荷重負荷点というのは、ピンで翼端リブ同士を接合するための位置でありここに穴を空けてボルトとナットを使って結合を行う事になる。

なお、「3. カーボンリブ製作法の模索 ①どの位置に補強を施すべきか」でも触れたが、ここでいうピンでの翼端リブ同士の接合について解説をする。

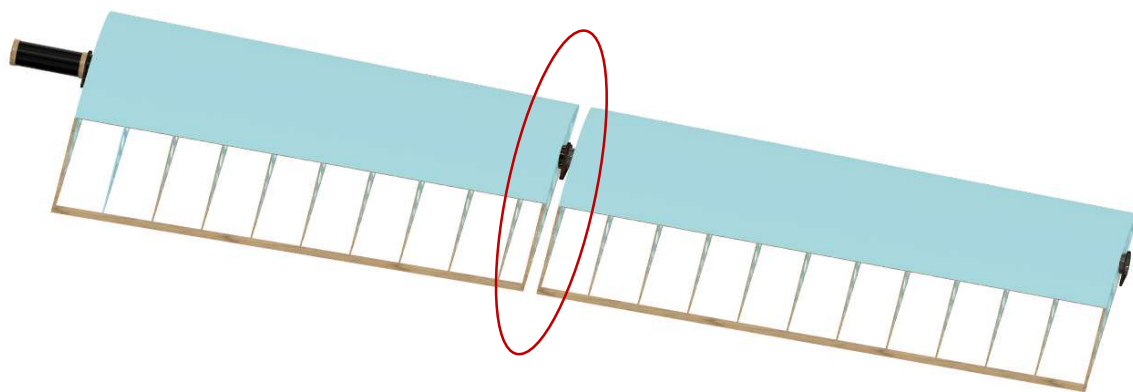


図3 翼同士の結合

これまではこの翼同士の結合というのをこの間にある接合の機構（フランジ）に持たせていたが、カーボンリブにして強度を持ってもらう事で、この接合の機能を翼端板に持たせることになる。これはこの実験の2番目に強いモチベーションである。

曲げ試験は次の図4のような片持ち梁のような手法を取った。



図 4 曲げ試験の様子

また、ねじれ試験は図 5 のような（これもまた曲げ試験同様に片持ち梁と同じである）手法を取った。



図 5 ねじれ試験の様子

どちらの実験でもペットボトルに入れた水の重さを計量し、それを重りに用いた。目視ではあるが、リブの翼弦が地面に対して水平になっている状態を 10 秒維持できれば合格とする。

各試験について、その結果を表 4, 5 に示す。

表 4 ねじれ試験の結果

ねじれ試験								
バルサのみ			カーボンのみ			バルサ+カーボン		
おもり (g)	破断判定	様子	おもり (g)	破断判定	様子	おもり (g)	破断判定	様子
800			2000			6600		
900			3000			8600		
1000			5000			10600		
1200			5800			11600		
1300			6000			13600		
1400			6200			15600		
1500			6400			17600		
2000			6600			19600		
2400			6800			20900		
3000			7000		軋む音	23000		軋む音
3100			7100			23100		
3300			7200			23200		
3500			7300			23300		
3700			7400			23400		
3800			7500			23500		
3900			7600			23600		
4000			7700			23700		
4200			7800			23800		
4500			7900			23900		
5000			8000			24000		
5100			8100			24100		
5200			8200			24200		
5300			8300			24300		
5500			8400			24400	破損	ピン穴
6000		軋む音	8500					
6100			8600					
6200	破損	ピン穴	8700					
			8800					
			8900					
			9000	20秒ほど	桁との結合部がねじれ破損			

表 5 曲げ試験の結果

曲げ試験								
バルサのみ			カーボンのみ			バルサ+カーボン		
おもり (g)	破断判定	様子	おもり (g)	破断判定	様子	おもり (g)	破断判定	様子
1000			100			2200		
1500		軋む音	200			2300		
1600			300			2400		
1700			400			2500		
1800			500			4100		
1900			600			4200		
5100			700			4300		
5200			800			4400		
5300			900			4500		軋む音
5400			1000		軋む音	4600		
5500			1100			4700		
5600			1200			4800		
5700			1300			4900		
5800			1400			5000		
5900			1500			5100		
6000			1600			5200		
6100			1700			8700		
6200			1800			8800		
6300	破断		1900			8900		
			2000			9000		
			2100			9100		
			2200			9200		
			2300	破損	時間をかけ	9300		
						9400		
						9500	破断	

なお、表 4,表 5 とともに音などの明確な異変を感じるまでは値をジャンプさせておもりを吊るすなどしている。軋む音が鳴った時点で、試験対象が降伏したと考えている。

破壊の種類として、ねじれ試験においてはピン穴による破壊と結合部（桁穴）による破壊が、曲げ試験においては、バルサとバルサ+カーボンにおいて曲げによる破断、カーボンのみにおいて座屈のそれぞれの試験において 2 種類の破壊が見られた。

この値を基に次の値（表 6，表 7）を出して考察を行う。

表 6 各種破壊の評価値

ねじれ試験			曲げ試験		
バルサ(N)	カーボン(N・mm)	バルサ+カーボン(N)	バルサ(N/mm ²)	カーボン(N/mm ²)	バルサ+カーボン(N/mm ²)
6.08E+01	3.49.E+04	2.39.E+02	4.09.E+01	1.38.E+01	7.97.E+01

ねじれ試験におけるバルサとバルサ+カーボンのものはピン穴による破壊なのでそのまま破壊時の荷重を、ねじれのカーボンのみのは桁の中心を基準としたモーメントを、曲げ試験における値は全て破断面から算出した断面係数を用いて算出した曲げ応力の値である。

表 7 各種降伏の評価値

ねじれ試験			曲げ試験		
バルサ(N)	カーボン(N・mm)	バルサ+カーボン(N)	バルサ(N/mm ²)	カーボン(N/mm ²)	バルサ+カーボン(N/mm ²)
	2.72.E+04		9.75.E+00	6.02.E+00	3.77.E+01

ねじれ試験において、バルサとバルサ+カーボンに関しては音がした状況と破損状況に関連が見つけられず、パイプとの接合部近傍で大変形をしたのか、ねじ穴が壊れたのかが分からず、降伏時の



図 6 各破壊の様子

5. 考察

まず、ねじれ試験の結果について、捻じれで破壊したのはカーボンのみを貼り付けた時であった。

機体において最もねじれモーメントが付加されるのは機体の根本であるが、我々の機体でその根本に負荷されるねじりモーメントは $-6.26 \times 10^3 [\text{N} \cdot \text{mm}]$ である。

取付位置の調整ではさらにこれを低減することも出来るが、強度試験の結果から見ると、カーボン

だけの場合でも十分な余裕をもってこれに耐えることが出来る。それ以上の荷重に耐えていたバルサ材、バルサ+カーボンと言うまでもない。

しかし、ピン穴による破損というのは我々が考慮していなかった破壊である。現機体の重量は 90[kg]であり、当然定常飛行時は釣り合う揚力として 90[kgf]が機体に負荷される。これを 220 枚のリブで支えるので一枚当たりには平均的に $0.409[\text{kgf}]=4.01[\text{N}]$ が負荷されるとするならば、これもまたピン穴分を余裕を持って耐えることが出来る。しかし、実際の飛行において揚力は均一に負荷するわけではない。

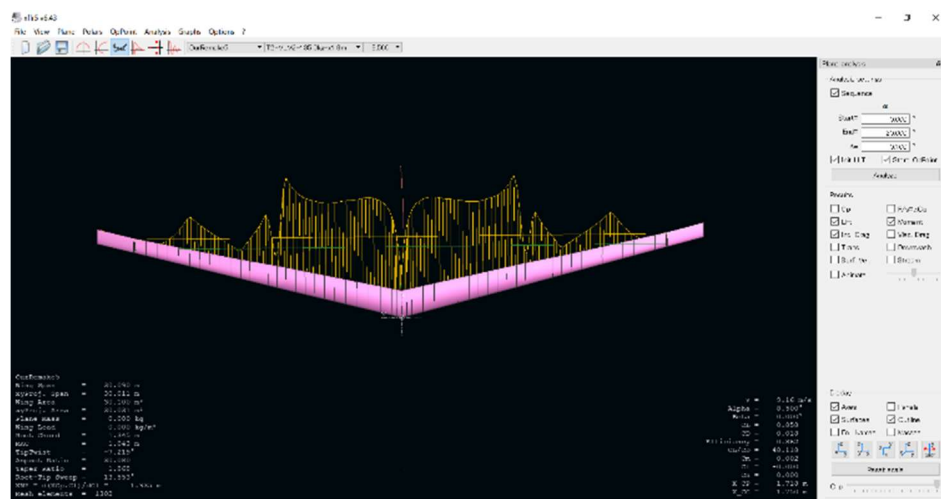


図 7 揚力の分布

図 7 は xflr5 ver8.3 を用いた解析結果から想定される揚力の分布である。これを基に一番負荷のかかる位置における揚力を確かめたところ、7.72[N]であった。この結果から見てもかなり余裕を持って耐えることができるであろう。なお、実際はさらに桁もその負荷を分配して持つため更に余裕が生まれることになる。このことから、ピン穴に負荷される荷重もクリア出来る。

次に、曲げ応力について考察をする。機体において、曲げとして負荷される要素として考えられるのは、「抗力（翼に垂直に吹き込んだ要素）による翼の後方向への圧縮」、「抗力によるせん断方向への曲げ」の 2 つである。

どちらも抗力によるものであるが、我々の機体には尾翼がないため、主翼の一部を尾翼の代わりに使うという発想を用いている。そのため、翼を後ろ側に傾ける後退角を設ける必要がある。すると、機体に負荷される抗力が後退角によって一部せん断方向への力となるのである。

この 2 つの負荷は、桁の取り付け部による固定があるため、重なり合って負荷される地点は存在しないであろう。

そのため、より大きい負荷を持つものを考える。すなわち、抗力による翼の後方向への圧縮の方が大きくなる。

我々の機体において、負荷される最も強い曲げモーメントは 4800[N・mm]程度である。本実験における破壊地点における断面での曲げ応力は、 $11.8[\text{N}/\text{mm}^2]$ であるため、これもまた余裕を持って耐える。さらに、桁がその曲げの一部を負担するため、さらに余裕が生まれる見込みがある。

最後に剛性についての比較を行う。

3種類の翼端リブを比較すると、明らかにバルサ材にカーボンをクロスに接着することによって従来の翼端リブ（バルサ材のみを使用したもの）よりも4倍近く降伏点が大きくなっており、かなりの剛性を得たことが出来たと言える。

6. まとめ

本実験の主目的は、カーボンリブの剛性・強度の観点から我々の機体に採用することが可能かどうかである。その評価を曲げ試験とねじれ試験の2つで行い、破壊まで至らせることでどのような荷重に弱く、実際に機体に実装した時に破壊が起きないか、剛性の向上が見込めているかを確認した。

結果から、カーボンリブは求められる強度にかなり余裕があり、今回は一枚積層であったが、これを増やすことでさらなる強度も見込めることから、採用に足るという事が分かった。

また、その時のたわみの様子を見てみると、バルサリブよりもかなり変形が少なく、カーボンをクロスに接着することによる功利を確認することも出来た。

しかし、ピン穴による破損というものが未考慮の問題であったことも考えて、実装時にはこのピン穴にもカーボンをクロスなどで補強を施すのがより良いと思われる。

余談ではあるが、バルサにカーボンをクロスに接着したカーボンリブを我々のメンバーが思い切りコンクリートブロックに叩きつけた時も多少の凹みこそあったものの破壊には至らなかったため、想定以上の強度が得られていることを知る事が出来た。

7. 参考文献

¹工学系のための統計概論 I・ガットマン/S・S・ウィルクス 共著 石井恵一/堀素夫 共訳
(t分布の%点はこちらの文献の値を使用)

²航空力学の基礎 牧野光 著

8. 謝辞

この度の実験はアドバイザー教員である工学研究科電気電子情報通信工学専攻 尾崎先生の御協力あつてのものです。心より感謝を申し上げます。本当にありがとうございました。