

人力飛行機用CFRPパイプの曲げに関する研究

和田 大樹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 航空宇宙工学科

(〒899-4395 鹿児島県霧島市国分中央 1-10-2)

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

Research of CFRP Pipe for Man-powered Airplane

Hiroki Wada¹, Shunichiro Nakamura²

¹ Undergraduate, ² Guest Professor,

Dept. of Aeronautics Eng., Daiichi Univ. 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 standpoint of flight safety. Usually these beams are designed under bending moments loaded by air pressure and inertia force. Recently, pipes made by carbon fiber reinforced plastics (CFRP pipe) are used for the beams. In this report, two types of test were conducted to the CFRP pipe. One is cantilever beam subjected to a single load at the end of the beam. The other is simply supported beam with concentrated load at the middle of the beam. These test results are compared with analyses by FEM and conventional beam theory. As a result of this study, suggestions to design of CFRP pipe for the human-powered airplane are shown.

Key Words: human-powered airplane, CFRP pipe, cantilever beam, simply supported beam

1. はじめに

近年、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)が人力飛行機の構造に一般的に使われるようになってきた。我が大学でも人力飛行機の飛行を目指しており、航空機設計部のサークル活動として、機体の設計・製作および飛行を行っている。人力飛行機において、CFRPを多く使用している部位として、胴体フレーム、主翼桁、尾翼桁およびコックピット骨組が挙げられる。最初に製作した機体では飛行に成功したが、次に軽量化を図って製作した機体では、主翼桁の破損・破壊により飛行が成功しないとの事態に見舞われた。これについては設計における精度の問題や、製作における問題などが考えられる。

そこで、CFRP製の桁用パイプ(CFRPパイプ)の設計の精度に着目して研究することとした。本報告書では、CFRPパイプに曲げモーメントを負荷した場合について、有限要素法解析(FEM解析)と梁理論解析による予測値を実験による実測値と比較し、その差異を見出して考察を加えた。その結果から、人力飛行機用CFRPパイプの設計にFEM解析を取り入れることの利点を得た。また、設計の使用するはずみを得ることができた。しかし、現在得られている解析結果は、本報告で述べるように課題がある。そこで今後、使用したCFRPパイプの材料特性データを取得した上で、本報告の解析結果を補正することにより正確な設計に供しうることができると考えられる。

2. 試験供試体および試験要領

今回の試験では3年前の試験飛行で使用した人力飛行機の主翼桁用CFRPパイプの一部分を使用した。積層構成は $[90^\circ/45^\circ/0^\circ_2/-45^\circ/90^\circ]$ である。肉厚は0.9mm、外径は72mmである。長さは片持梁が700mm、単純支持梁が1000mmとした。試験における支持位置と荷重位置を図1および図2に示す。

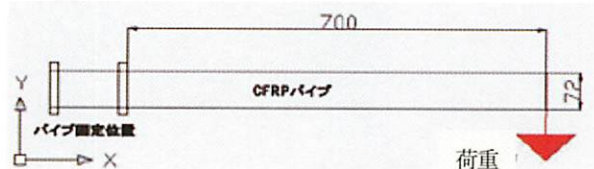


図1 片持梁における荷重位置と支持位置

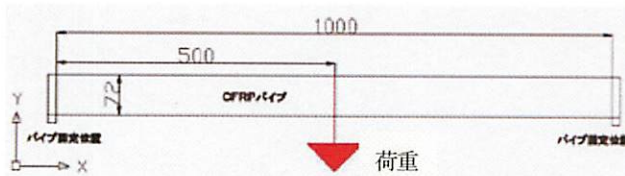


図2 単純支持梁における荷重位置と支持位置

3. FEM解析による予測値の算出

CFRPパイプに一定荷重を負荷した時の応力分布の把握および変位予測を目的としてFEM解析を行った。モデル化は積層毎には行わず、肉厚 $t=0.9\text{mm}$ 、縦弾性係数 $E=6300\text{kgf/mm}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.34$ の一様なパイプとした。縦弾性係数は層構成比を考慮して計算した¹⁾。予測値と実験値を比較する為、荷重は100Nとした。計算はAltair社提供のソフト(プリ処理: HyperMesh、FEAソルバー: RADIOSS、ポスト処理: HyperView)を使用した。

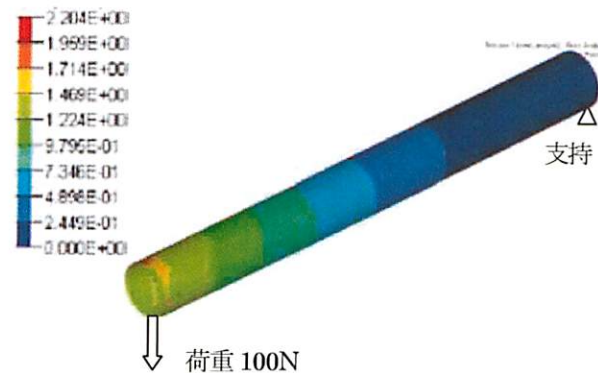


図3 片持梁解析結果(変位)

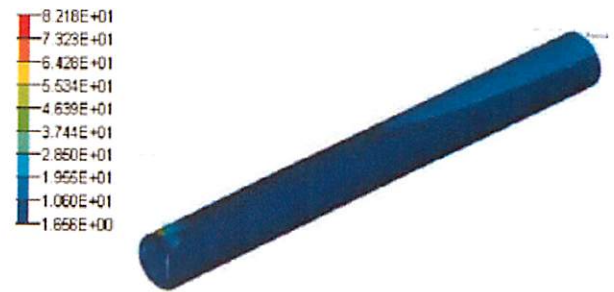


図4 片持梁解析結果(Von Mises 応力)

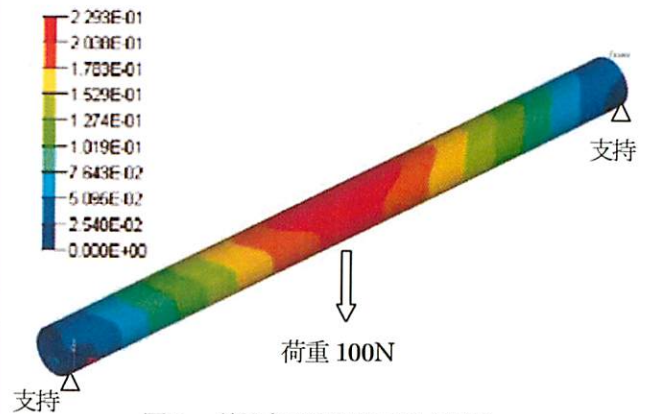


図5 単純支持梁解析結果(変位)

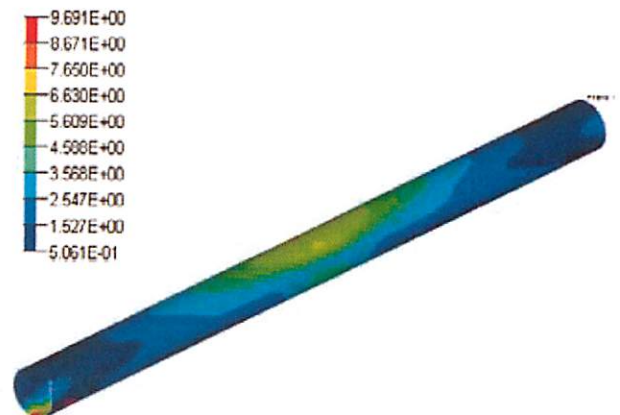


図6 単純支持梁解析結果(Von Mises 応力)

片持梁に100Nの力を加えた時の解析結果は、梁の荷重位置での上面下向変位が2.20mm、下面下向変位が1.35mmである(図3)。また、支持端での上面引張応力が19.6MPa、下面圧縮応力が-19.6MPaである(図4)。単純支持梁に100Nの力を加えた時の解析結果は、梁中央での上面下向変位が0.23mm、下面下向変位が0.17mmである(図5)。また、梁中央での上面圧縮応力は-7.1MPa、下面引張応力は5.1MPaとなる(図6)。

4. 破壊試験

試験治具はステンレス製アングル材を組み立てて自作した。試験は片持梁になるようCFRPパイプをセットした場合と、単純支持梁になるようCFRPパイプをセットした場合について行った。引張荷重は片持梁試験ではベルトを介し、単純支持梁試験ではワイヤを介して、自動車用の手動ジャッキの変位により加えた。それぞれの試験はパイプが破壊するまで負荷した。この間、パイプに貼付したひずみゲージの値および荷重校正した引張試験片のひずみを計測した。ひずみはPCD-300Bセンサインタフェースを介してPCに記録した。たわみはダイヤルゲージの指示値を読み取りメモに記録した(図7、図8)。



図7 試験治具および片持梁試験状況



図8 単純支持梁試験状況

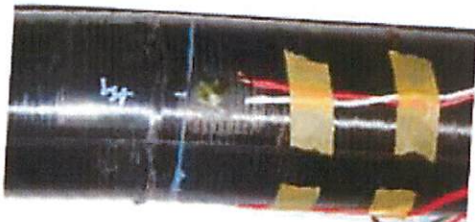


図9 片持梁の破断



図10 単純支持梁の破断

試験の結果、片持梁では圧縮側になるCFRPパイプ下部より破壊した(図9)。単純支持梁では、圧縮側になるCFRPパイプ上部より破壊した(図10)。いずれも座屈破壊であった。

100Nの荷重を加えた時のパイプ上面の最大変位は、片持梁においては1.5mmであり(図11)、単純支持梁においては0.2mmである(図12)。

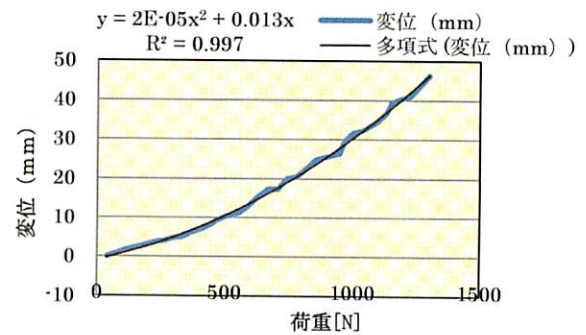


図11 片持梁における変位

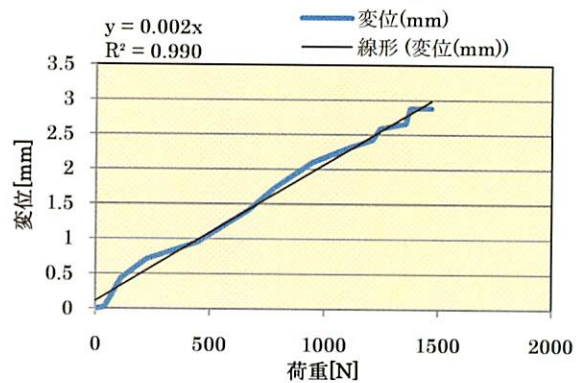


図12 単純支持梁における変位

片持梁においては破壊荷重が1281Nとなり、上面の最大引張りひずみは2980 $\mu\epsilon$ 、下面の最大圧縮ひずみは-3460 $\mu\epsilon$ である(図13)。圧縮ひずみはこの荷重を境に急激に減少し、この時点で破壊が生じたことを示している。

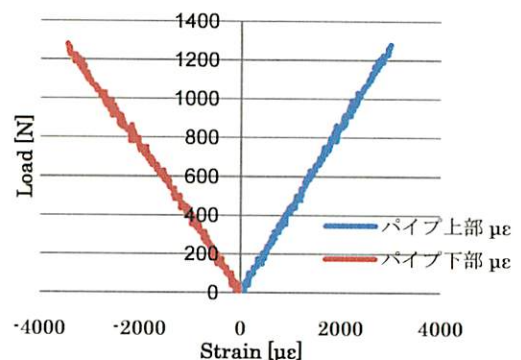


図13 片端梁における荷重-歪

単純支持梁においては破壊荷重が1429Nとなり、上面の最大圧縮ひずみは $-1095\mu\epsilon$ 、下面の最大引張ひずみは $1180\mu\epsilon$ である。圧縮ひずみはこの荷重を境に急激に増加し、片持梁と同様に、破壊が生じたことを示している(図14)。

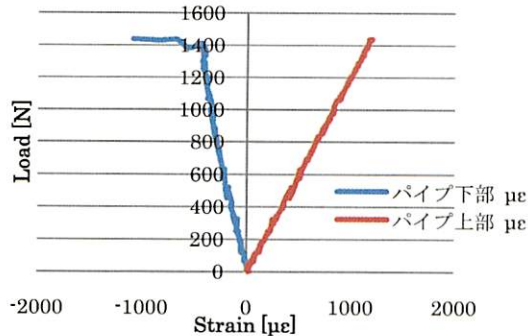


図14 単純支持梁における荷重-歪

5. 考察

試験結果をFEM解析および梁理論による解析と比較する。ただし、CFRPの縦弾性係数は引張、圧縮ともに3項に示す計算値 $E=6300\text{kgf}/\text{mm}^2$ を用いた。

片持梁において梁支持部から700mmの位置に100Nを荷重したときのデータを比較する。荷重位置での変位は試験結果が1.3mmとなり、梁理論²³⁾の1.46mmおよび、FEM解析のパイプ上面変位2.20mm、下面変位1.35mmと良く一致する。支持部でのひずみは、試験結果がパイプ上面で $233\mu\epsilon$ 、パイプ下面で $-277\mu\epsilon$ となり、梁理論での $\pm 321\mu\epsilon$ および、FEM解析でのパイプ上面の $319\mu\epsilon$ 、パイプ下面の $-319\mu\epsilon$ よりも小さめである。

単純支持梁において梁中央に100Nを荷重したときのデータを比較する。梁中央の変位は試験結果が0.2mmとなり、梁理論の0.25mmおよびFEM解析でのパイプ上面変位0.23mm、下面変位0.17mmと良く一致する。梁中央でのひずみは試験結果がパイプ上面で $-35\mu\epsilon$ 、パイプ下面で $83\mu\epsilon$ となり、梁理論での $\pm 112\mu\epsilon$ および、FEM解析におけるパイプ上面の $-106\mu\epsilon$ 、パイプ下面の $85\mu\epsilon$ よりも小さめである。

破断時の最大ひずみの絶対値は、片持梁の試験では圧縮側が引張側の1.16倍となり圧縮側が大きい。単純支持梁の試験においては圧縮側が引張側の0.93倍となり圧縮側が小さい結果となった。また、単純支持梁の試験ではワイヤを介して集中荷重の荷重をしたことによる局所的な荷重集中の影響も考えられる。

これらの変位および最大ひずみの試験結果は今後、人

力飛行機の設計を行うにあたり考慮すべき点であるが、変位およびひずみの計測値と解析値との差は大きいもの、いずれも小さめにある。しかし精度については下記の課題に取り組む必要がある。

① 梁理論やFEM解析に使用した縦弾性係数は、積層構成比から得た計算値を東レのT700/350°F系樹脂の材料データ⁴⁾で補正した値である。JAXAの材料特性データ⁵⁾では縦弾性係数および強さは圧縮側が引張側より小さい値である。従ってパイプと同じ材料と層構成を持つ試験片による材料データ取得試験を行い、縦弾性係数および許容ひずみの補正を行う必要がある。

② 変位については、解析は微小変形の値であり、一方、試験時の変位は、ダイヤルゲージの変位にはっきりとわかる大きさである。従って計測する変位方向を正確に設定する必要がある。

③ パイプ固定用に木材を使った治具で試験をした。加工しやすいという点から木材を選んだのだが、木材自体が荷重に耐えられずに歪んでしまっている事も考えられる。試験機本体はステンレス製のアングルをボルト・ナットで固定し製作しており、荷重によるアングル材のズレや湾曲が発生してしまっている事も考えられる。また、単純支持梁においては、ベルトを荷重用に使用したが、破損した為にワイヤに変更した。その為パイプの局所の変形が生じ、ひずみに影響したことも考えられる。

④ FEM解析は層構成6層を古典理論で一枚の板として縦弾性係数を求め解析しており、各層に分割した解析が精度向上になると思われる。

6. まとめ

この度の研究により、人力飛行機を設計するに当たり、事前にCFRPパイプの解析を行う事で、実機でのひずみを予測し、より精度の高い設計を可能にすることが検証できた。しかしながら考察で述べたようにいくつかの問題点があり、FEM解析プログラムの使い方を、習熟や試験自体の改善など、今後はこの研究をさらに詰めていく事により、精度の高い設計が可能となる。

参考文献

- 1) 小林繁夫: 航空機構造力学、丸善
- 2) 本田外明, 河端 裕, 新保 實: わかりやすい材料力学の基礎、共立出版
- 3) 黒木 剛司郎: 材料力学、オーム社
- 4) 東レホームページ
- 5) Advanced Composites Database System: JAXAACDB; Ver. 06-1