

人力飛行機のプロペラブレードの荷重試験

○吉川俊明(榊浅沼組), 堀琴乃(TOTO榊),

佐多宏太(トヨタ自動車榊), 渡部雅晃(マツダ榊), 吉川剛明(神戸大学大学院),

Loading test of propeller blade of Human-Powered Airplane

Toshiaki Yoshikawa, KoToNo Hori

Kouta Sata, Masaaki Watanabe and Takaaki Yoshikawa,

Key Words : Human-Powered Airplane, Propeller blade, Loading test, Pulse

1. はじめに

人力飛行機のプロペラブレードは、飛行中の空力や回転力により様々な応力が発生する。中でも空力荷重によって生じる曲げ応力と捻り応力は、プロペラの性能を大きく左右する。特に曲げ応力は、人力飛行機特有のペダリングによる脈動の影響が大きく、運転中のブレードの変形に対して支配的である。

ブレードの構造は、片持ち形式の CFRP パイプを用いた単一スパーや外皮に GFRP、CFRP を用いた応力外皮構造(ストレススキン)、或いは、それらの複合構造が一般的である。

これまで運転中のブレードの曲げ・捻り変形については、人力飛行機の性能を決定付ける重要な要因でありながら、ブレード独特の構造や外皮の協力による剛性寄与が未解明なため、詳しく把握されていなかった。特にスパーと応力外皮を組み合わせた複合構造では外皮の協力による剛性向上が著しく、実用状態における変形の実態が不明であった。

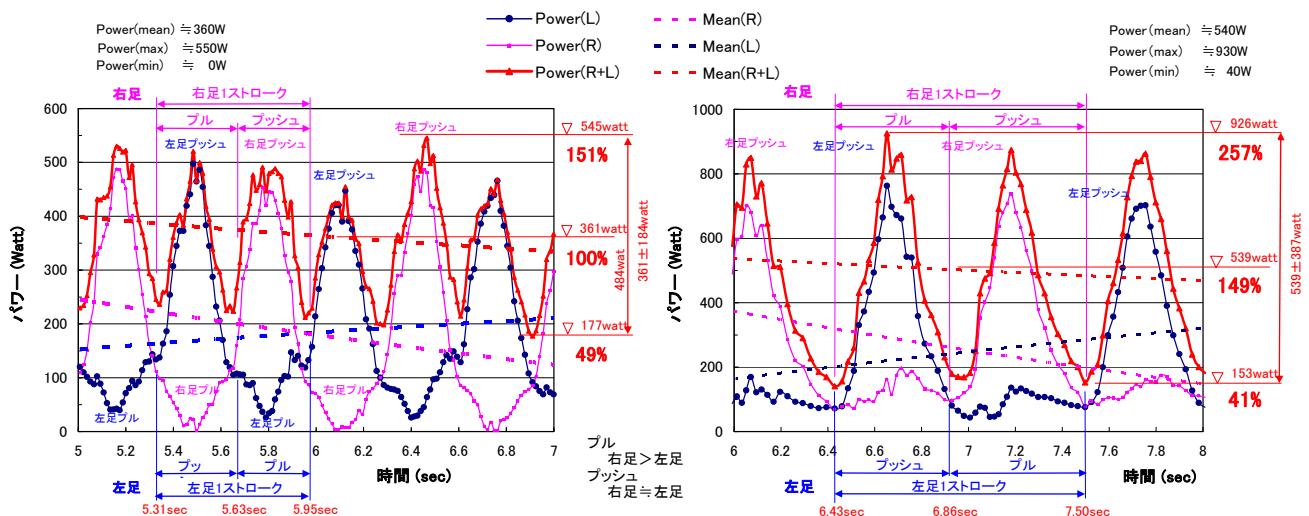
今回我々は、その手始めに簡易曲げ試験を実施したので、以下に報告する。

2. 脈動の影響を考慮した荷重倍数の設定

パイロットのペダリングによる出力は、ペダルからスプロケットやチェーン、トルクチューブ、ハブ等の動力伝達装置を介してプロペラブレードに伝達される。その時その回転速度は、動力伝達装置や左右の足のペダリングの脈動の影響(回転速度の変化)を受けて複雑に変化する。

ブレードはペダリングの脈動により回転速度の増減を繰り返す。我々の場合1秒間におよそ 2.5 サイクルでそれを繰り返し、同時に変形も繰り返す。繰返し応力の影響は極めて大きく、ブレード付け根部のプロペラハブやプロペラシャフト、それらの接合部等の設計にも影響を及ぼす。プロペラ効率に与える影響も著しく、ブレードの強度が不十分な場合、飛行中の振動や効率低下の原因をはじめ、パイロットのパワーロスにも繋がる。中でもブレードの剛性は、その性能を左右する重要な部品であると共に、人力飛行機の飛行性能を左右する。

従って、今回の簡易試験に当たっても、脈動による回転速度やトルク、出力パワーの変化を慎重に把



ロータリーペダリング(定常飛行:かき回すように回転) 92.3 rpm

プッシュペダリング(離陸〜上昇:押し漕ぎ) 57 rpm

図-1 ペダリングの違いによるパワーの変化(ペダル側)

握しておくことが重要である。

我々は、第8 回同シンポジウムの『人力飛行のペダリングに関する考察』¹⁾で、1/1000 秒サイクルで、ペダルとプロペラシャフトの回転速度、ペダルのアームとプロペラシャフトの応力の変化を測定し、回転速度とトルク、パワー、伝達効率等のペダリングの詳細を明らかにした。それによると、定常飛行時のパワーは、平均出力を中心に上下に約 50% の振幅（脈動）が生じることが解る（図-1 参照）。今回の簡易試験ではそれらを基に、①平均出力と脈動による最大・最小出力、②離陸～上昇時の最大出力の影響、等を検討して 3 通りの荷重倍数を設定した。

3. 簡易曲げ試験

簡易曲げ試験には、女性用人工飛行機

CHicK-2000 KoToNo

Record（青森県立三沢航空科学館で空中係留・常設展示）のプロペラを用いた。プロペラの概要は、直径：2840 mm、重量：750 g（375 g×2）、プロペラ回転数：156 rpm（ペダル回転数：90 rpm）、定常推力：16 N である。以下にプロペラの詳細を記す。

3.1 プロペラ形状

写真-1 と 図-2 にプロペラの形状を示す。



写真-1 プロペラ

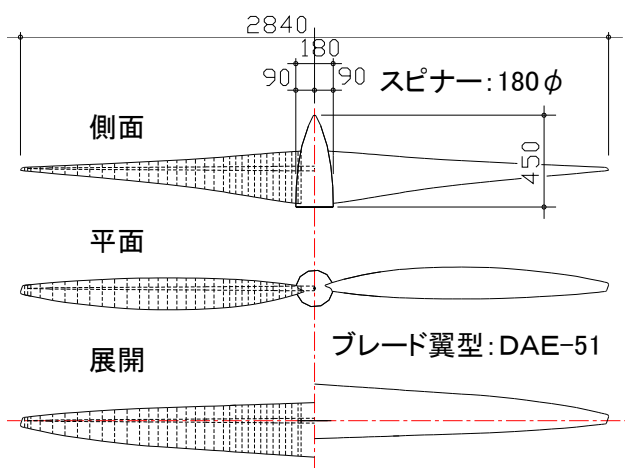


図-2 プロペラ形状

3.2 ブレードの構造

プロペラブレードは、CFRPパイプのスパーにバルサ板のリップを配置し、その外部に厚さ 2 mmのバルサ

板をシート貼り、18g/m² のマイクログラスで全面被覆してGFRP 加工した上、塗装およびフィルム貼りで仕上げている。CFRP パイプのスパーと外皮（バルサ+マイクログラスによるGFRP）の応力外皮構造による複合構造である。（今回の試験は、最終仕上げのフィルム貼り前の段階で実施した）

設計段階では、スパーの CFRP パイプのみで全荷重を負担できるように配慮している。スパーの詳細を 図-3 に、その断面性能を 図-4、ブレード断面を 図-5 に示す。

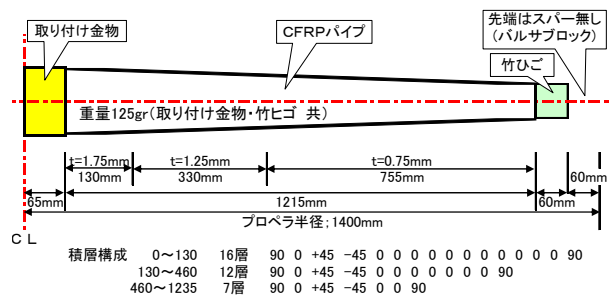


図-3 スパーの詳細

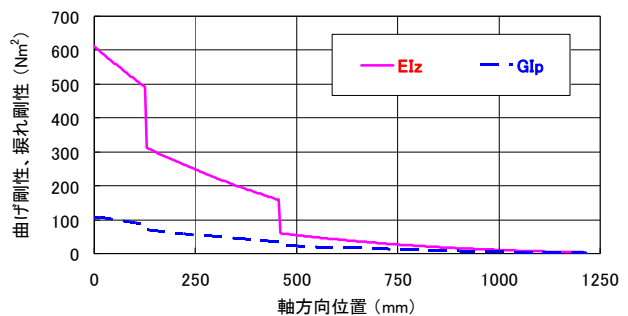


図-4 スパーの剛性分布

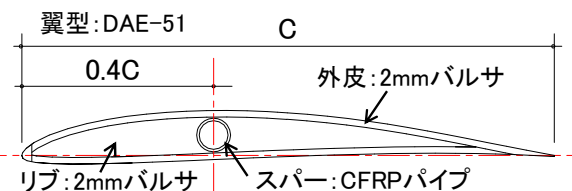


図-5 ブレード断面

3.3 試験方法

荷重試験は、①ブレードのスパーに用いる CFRP パイプのみ、②組立てが完了したブレード、の 2 種類の試験体を用いて実施し、結果を検証した。

ブレードの変形は、①飛行中の機体の進行方向、②それに直角（プロペラの回転方向）、の 2 方向を測定した。

試験に用いた荷重は、定常飛行中の推力を基に、図-6 に示す 5 箇所の集中荷重を設定した。荷重倍数は、定常飛行中と離陸～上昇中を想定してロータリーペダリングによる平均出力の 0.8 倍、1.6 倍、2.4 倍の 3 段階とした。（図-7 参照）

試験の様子を 写真-2～8 に示す。

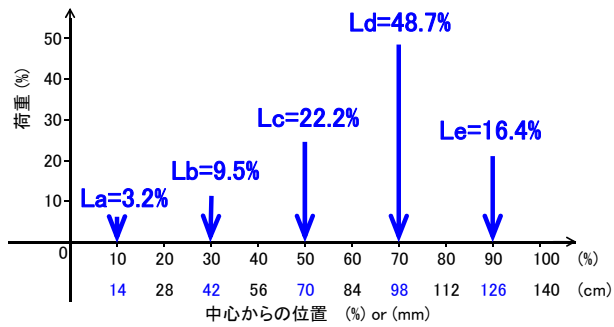


図-6 荷重分布

荷重倍数	位置	荷重(kg)					曲げモーメント(kgm)
		La	Lb	Lc	Ld	Le	
1	0.8 倍	0.039	0.118	0.278	0.609	0.206	1.250
2	1.6 倍	0.079	0.237	0.556	1.217	0.411	2.500
3	2.4 倍	0.118	0.355	0.834	1.826	0.617	3.751

ブレードに作用させる荷重 (kg)とブレード中心部に作用する曲げモーメント(kgm)

図-7 荷重倍数と荷重



写真-2



写真-3

上 写真-2 荷重
 中 写真-3 変位測定定規
 下 写真-4 変位測定方法
 { X方向：機体の進行方向
 Y方向：プロペラの回転方向



写真-5



写真-6



写真-4

写真-5 スパーのみの初期値の測定

写真-6 スパーのみの変位測定 (荷重倍数：2.4 倍)



写真-7

写真-7 ブレードの初期値の測定



写真-8

写真-8 ブレードの変位測定 (荷重倍数：1.6 倍)

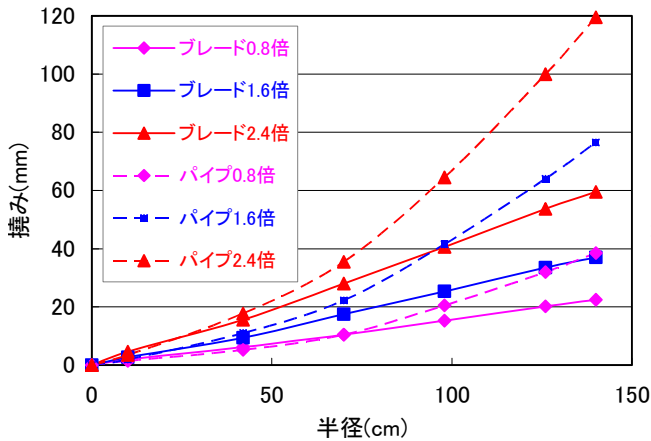


図-8 ブレードの撓み (機体の進行方向)

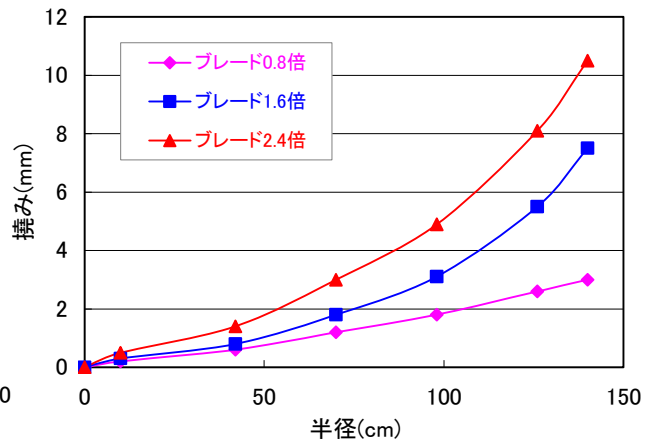


図-9 パイプの撓み (プロペラの回転方向)

3.4 試験結果

試験結果を 図-8~10 に示す。図-8 が機体の進行方向についてそれぞれの荷重倍数におけるブレード半径と変位、図-9 がプロペラの回転方向に対するそれである。図-10 には、機体の進行方向についてそれぞれの荷重倍数におけるブレード先端部の変位を示す。

3.5 考察

バルサで被覆した複合構造のブレードは、その断面の協力による剛性寄与によりスパーのみの場合に比べて変形量が著しく低減している。

- ①それは、機体の進行方向に著しく現れる。プロペラの回転方向は、パイプのみの場合はスパー方向の断面性能が一定で変形しないので、比較できない。
- ②機体の進行方向に関して各々の変形量は、荷重にほぼ比例している。
- ③その変形は、スパーのみの場合に比べて荷重倍数が 0.8 倍で 58%、1.6 倍で 57%、2.4 倍で 56% に変形が低減した。
- ④機体の進行方向の変形は、定常飛行時で 14 mm から 43 mm (最小値の 3 倍) までを 2.5 サイクル/sec で繰り返し、離陸～上昇時を想定した最大値はブレード先端部で 128 mm (最小値の 9 倍) と想定される。

以上を考慮すると、飛行中にブレードの振動を抑制するには、ブレードに十分な剛性が必要で有ることが解る。

我々は、飛行中のブレードの曲げ変形は、プロペラ半径の 1/20 (5%) 以下に抑制するべきであると考えている。今回の場合は、定常飛行時で 3.1 %、離陸～上昇時で 5.1 % であった。

また、今回の試験結果から判断すると、CFRP スパーだけの場合で、変形量をプロペラ半径の 2 % 程度に留めて置く必要が有ることが解る。

4. おわりに

今回の試験では、ブレードの捩れは測定していな

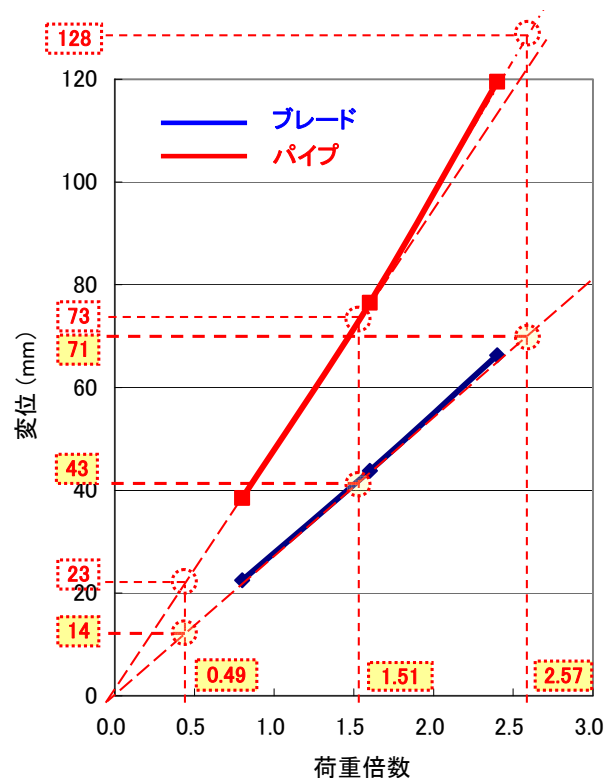


図-10 荷重倍数とブレード先端の撓み (機体の進行方向)

い。

回転中のプロペラブレードの変形を把握して、設計と製作にフィードバックすることは極めて重要で、それなしには人力飛行機の性能を極限まで追求することは出来ない。

今後は、測定装置の感度を改善してブレードの捻れ角も測定したい。

【参考文献】

- 1) 吉川俊明ほか：人力飛行のペダリングに関する考察. 第8回スカイスポーツシンポジウム講演集. 日本航空宇宙学会.