

人力飛行機のプロペラブレードの荷重試験



○吉川俊明(株)浅沼組), 堀琴乃(TOTO(株))
佐多宏太(トヨタ自動車(株)), 渡部雅晃(マツダ(株))
吉川剛明(神戸大学大学院)

発表の概要

1. プロペラブレードの荷重試験の必要性
2. 脈動の影響を考慮した荷重倍数の設定
3. 簡易曲げ試験
 - 3.1 プロペラ形状
 - 3.2 ブレードの構造
 - 3.3 試験方法
 - 3.4 試験結果と考察
4. 今後の課題



1. プロペラブレードの荷重試験の必要性

人力飛行機のプロペラブレード

飛行中の空力や回転力により様々な応力が発生

空力荷重 { 曲げ応力
捻り応力 } → プロペラの性能に影響

1) 人力飛行機特有のペダリングに起因

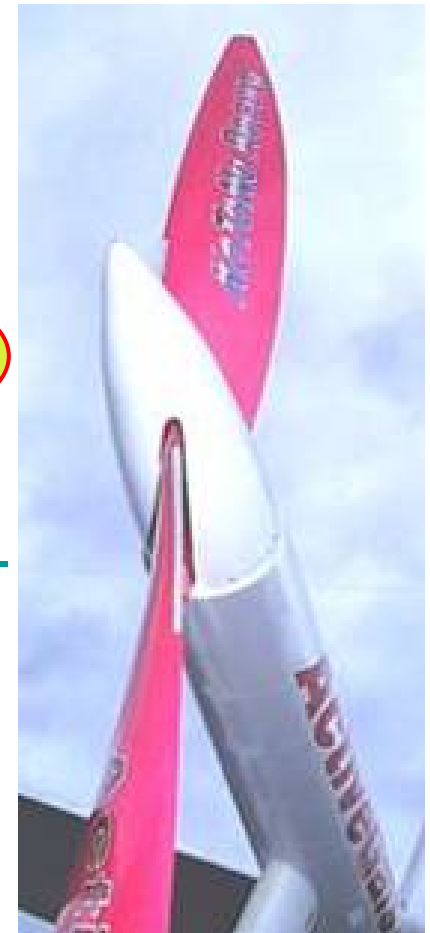
回転速度の変化 ⇒ 曲げ応力が変化

ブレードが繰り返し変形

ペダリングスキル
プッシュ・プル
左右のアンバランス

2) ブレードの構造

- ① 片持ち形式の CFRP パイプを用いた 単一スパー
- ② 外皮に GFRP、CFRP を用いた 応力外皮
(ストレススキン)
- ③ ①②の 複合構造



回転中のブレードの 曲げ・捻り変形

人力飛行機の性能を左右する要因の一つ



変形把握の問題点

- ① プロペラブレード独特の捻れた構造
- ② 外皮の協力による剛性寄与が未解明

特にスパーと応力外皮を組み合わせた 複合構造 は

外皮の協力による剛性向上 が著しい

そのため実用状態の変形の実態が不明

⇒ 今回、手始めに簡易曲げ試験を実施



2. 脈動の影響を考慮した荷重倍数の設定

ペダリングによる出力

スプロケットやチェーン、トルクチューブ、ハブ等の伝達装置を介してプロペラブレードに伝達

プロペラの回転速度: ペダリングの脈動で変化

- ブレードは脈動で **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** で繰り返し
⇒ 同様に **変形も繰り返す**

- ① **繰り返し応力** の影響
プロペラハブやプロペラシャフト、その 接合部等の設計に影響
- ② **プロペラ効率** に与える影響

ブレードの強度が不十分な場合

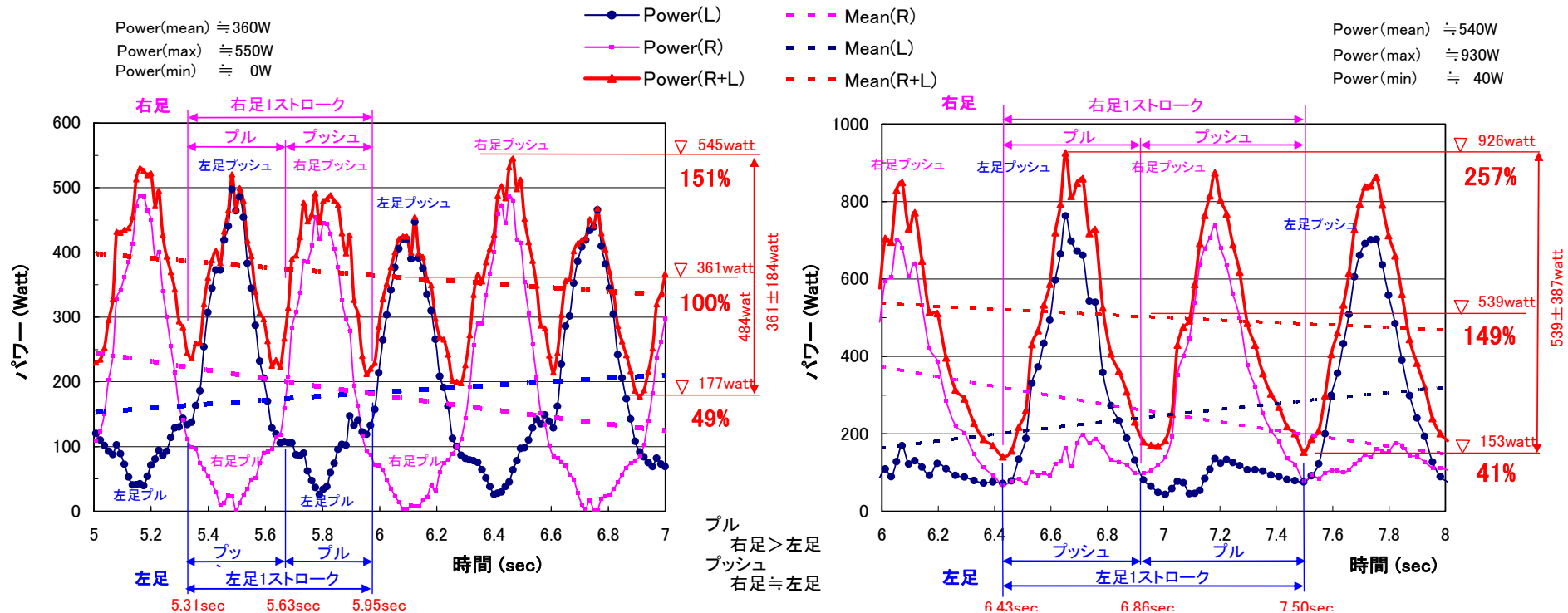
⇒ 飛行中の 振動や効率低下、パイロットのパワーロス

ブレードの剛性

プロペラの性能(=飛行性能)を左右する重要な要素

従って、簡易試験に当たっては

脈動による回転速度やトルク、出力パワーの 変化の把握 が重要



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

ペダリングの違いによるパワーの変化(ペダル側)

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』

1/1000 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 ⇒ 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報告

定常飛行時は、平均出力を中心に上下に約 50% の振幅(脈動)が発生

今回の簡易試験ではそれを基に、

- 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

3. 簡易曲げ試験

女性用人力飛行機 *CHick-2000 KoToNo Record*

(青森県立三沢航空科学館で空中係留)のプロペラを適用

プロペラの概要

直径: 2840 mm、

重量: 750 g (375 g/枚)

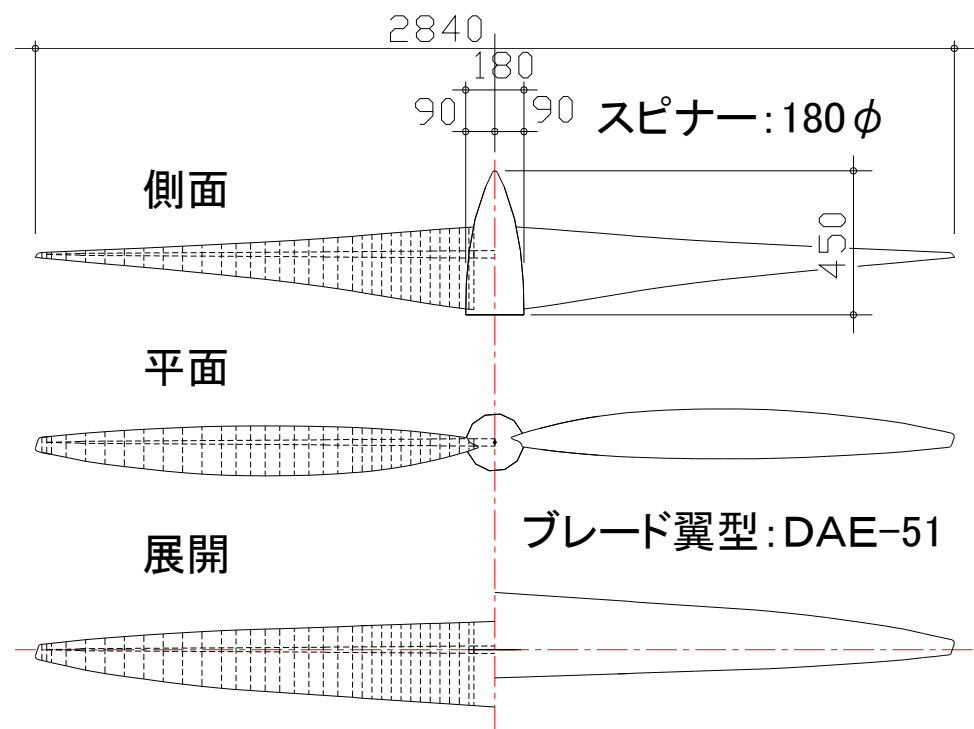
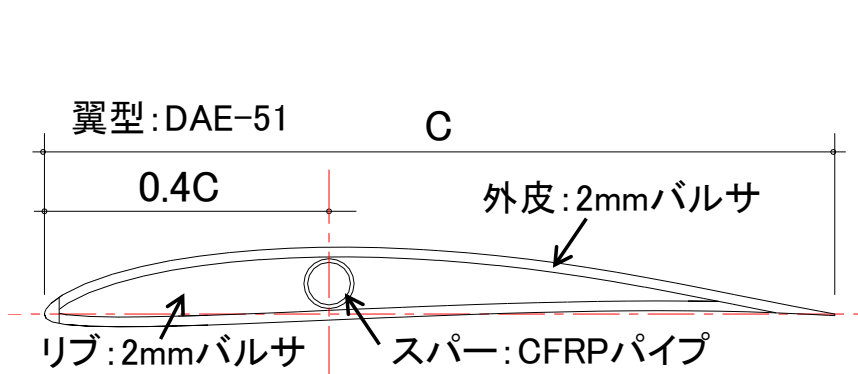
回転数: 156 rpm

(ペダル回転数: 90 rpm)

定常推力: 16 N



3.1 プロペラの形状とブレードの構造



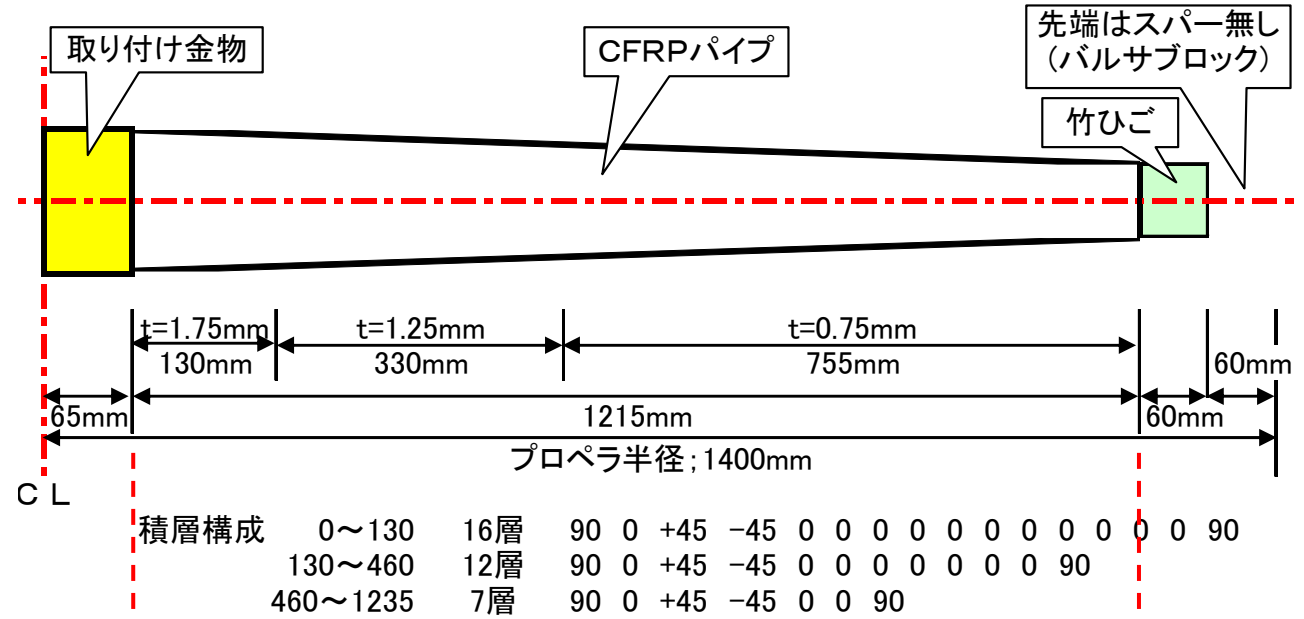
ブレード

CFRPパイプのスパーにバルサ板のリブを配置、その外部に厚さ2mmのバルサ板をシート貼り、 18g/m^2 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

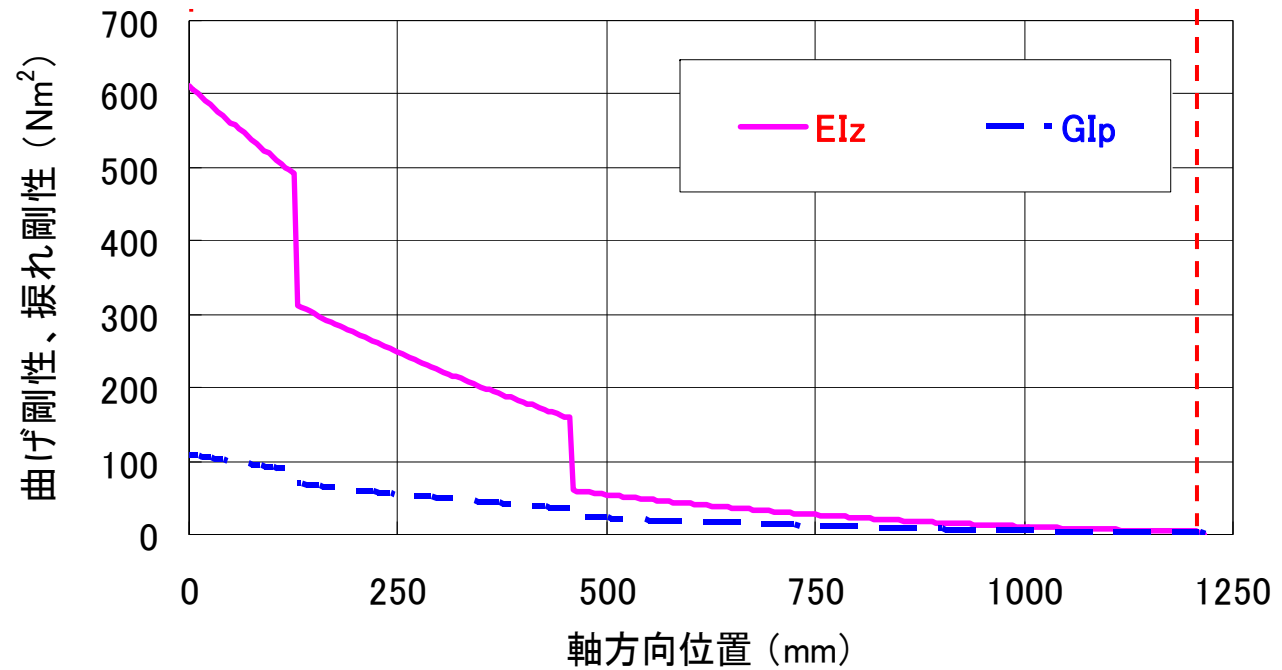
構造

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)の応力外皮による **複合構造** (試験は、最終仕上げのフィルム貼り前に実施)

積層構成



断面性能



3.2 試験方法

- 荷重試験に用いた試験体
 - ① ブレードのスパーに用いる CFRPパイプ単体
 - ② 組立てが完了したブレードの 2 種類
- 荷重
飛行中の推力を基に 5 箇所¹の集中荷重 を設定

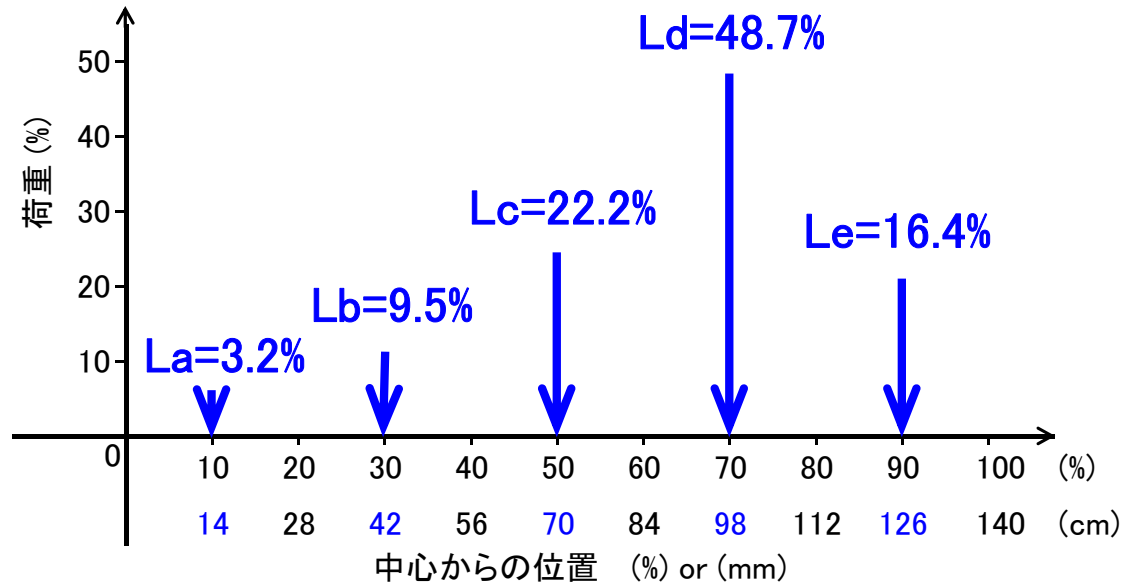


スパーの初期値設定
(自重による撓み測定)



ブレードの変位測定
(荷重倍数: 1.6倍)

荷重分布



荷重倍数

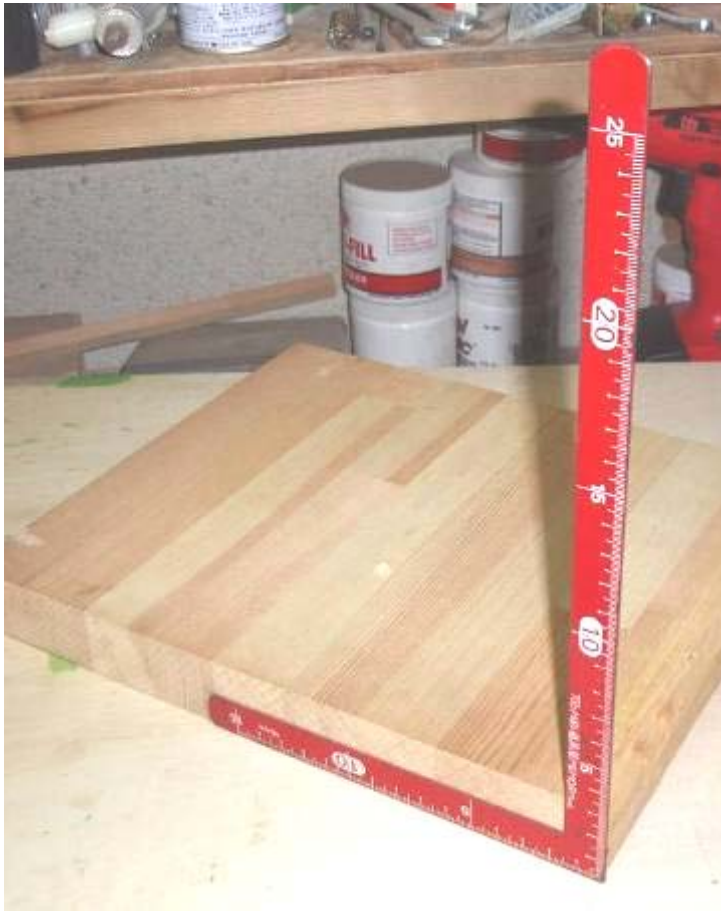
定常飛行中と離陸～上昇中を想定
 ローターペダリングによる平均出力の
0.8倍、1.6倍、2.4倍の3段階

位置 荷重倍数		荷重(kg)					ΣL	曲げ モーメント (kgm) Mo
		La	Lb	Lc	Ld	Le		
1	0.8倍	0.039	0.118	0.278	0.609	0.206	1.250	1.13
2	1.6倍	0.079	0.237	0.556	1.217	0.411	2.500	2.26
3	2.4倍	0.118	0.355	0.834	1.826	0.617	3.751	3.39

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)

変位測定 (2方向)

- 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)



変位測定定規

測定状況



試験状況



スパーのみの変位測定

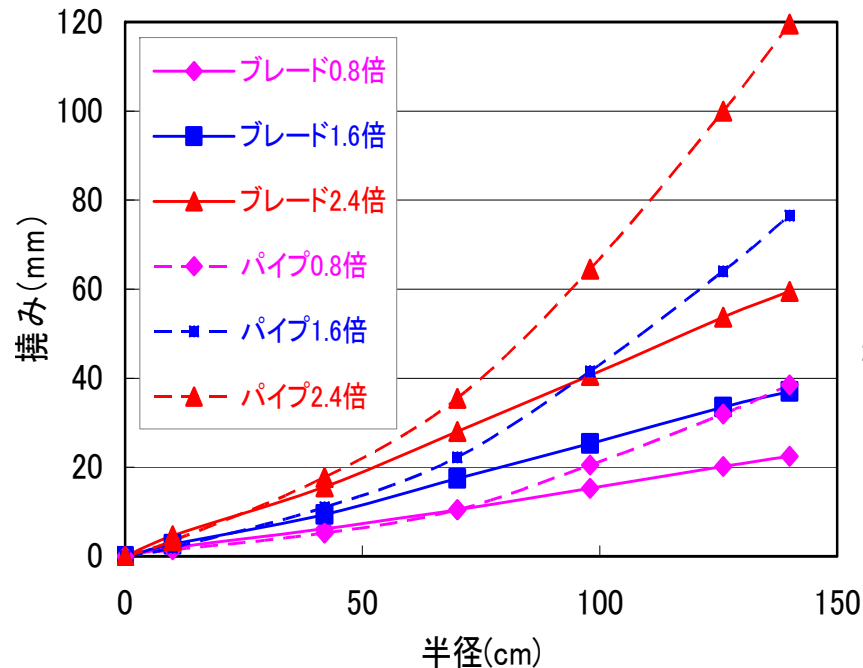
荷重倍数:2.4倍



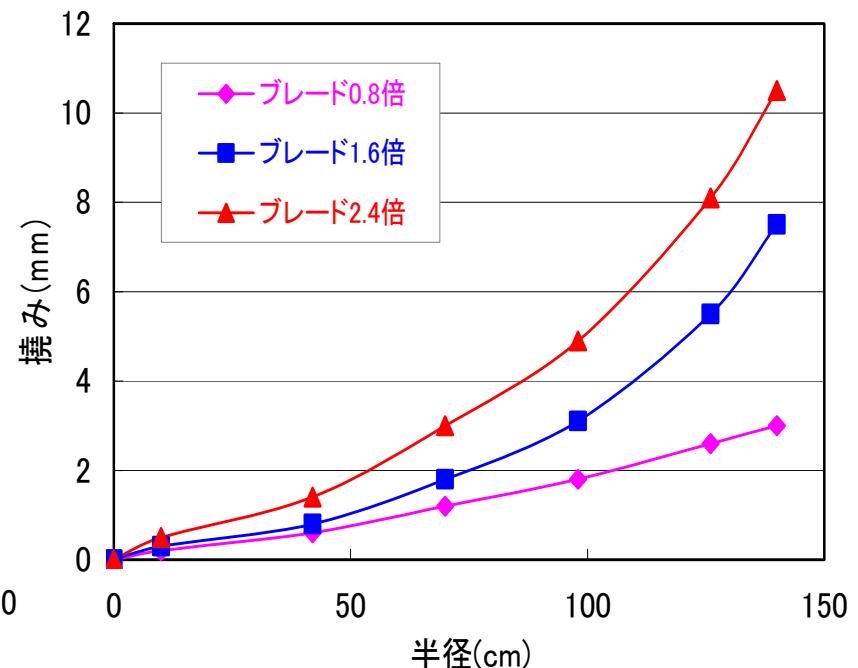
ブレードの初期値設定

(自重による撓み測定)

3.3 試験結果と考察



機体の進行方向の変位



プロペラの回転方向の変位

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

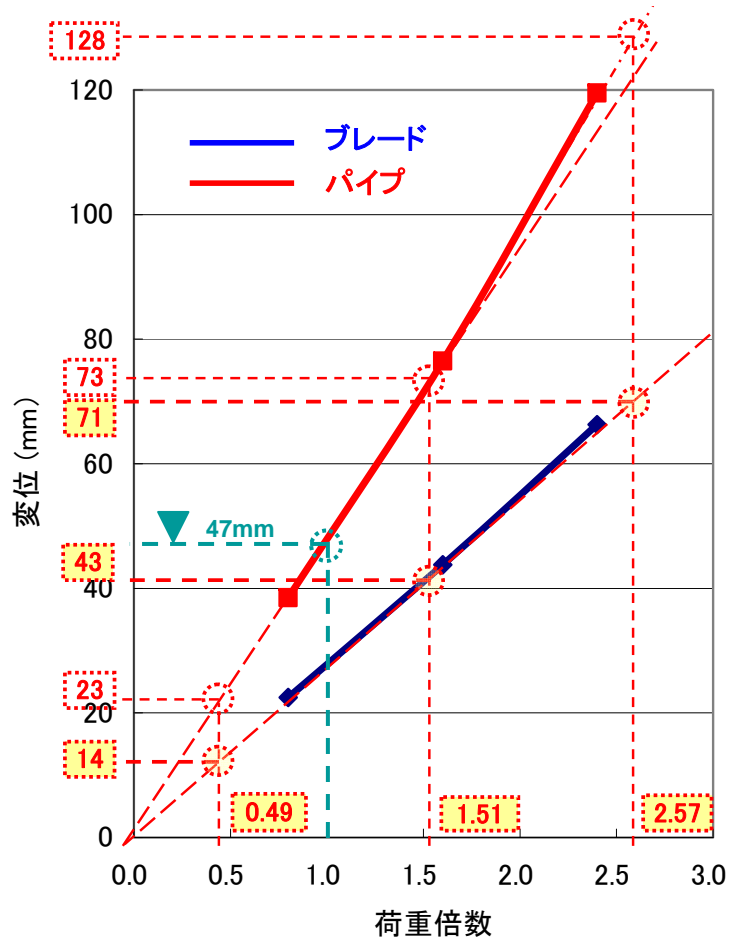
① それは、機体の進行方向に著しく現れる。

(プロペラの回転方向:パイプのみの場合は断面性能が一定で変形しないので、比較できない)

② 機体の進行方向の変形量は、荷重にほぼ比例している。

③ 変形量は、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% に低減 ⇒ **約60% に低減**



荷重倍数とブレード先端の撓み
(機体の進行方向)

- ④ 機体の進行方向の変形は、定常飛行で 14 mm から 43 mm(最小値の 3 倍)までを 2.5 サイクル/secで繰り返す と考えられる
 又、離陸～上昇時を想定した最大値 は ブレード端部で 71 mm(最小値の 5 倍) と想定される

以上を考慮すると、

- i) 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 であることがわかる
- ii) 飛行中のブレードの 曲げ変形は、プロペラ半径の1/20(5%=70mm)以下に抑制 するべきと考える
 今回は、

{	定常飛行時	<u>3.1 %</u>
	離陸～上昇時	<u>5.1 %</u>
- iii) 今回の結果から、スパーだけの場合で、平均出力時のブレード先端の変位を プロペラ半径の約3% (47mm)以下に抑制 しておく必要が有ることがわかる

4. 今後の課題



- 今回の試験では、ブレードの捩れは測定していない。
- 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、測定装置の感度を改善してブレードの捻れ角を測定したい。

以上