

中島九一式戦闘機の調査（その3）

嵯峨 弘*・三野正洋**

A Research on Nakajima Type 91 Fighter Plane. (Part 3)

Hiromu SAGA* and Masahiro MINO**

Type 91 Nakajima fighter planes were broadly categorized into two types, namely, Mk1 and Mk2. Mk1 was equipped with a Jupiter VII engine licensed by Bristol, and a wooden propeller. While, Mk2 was equipped with a Japanese made Type 94 engine (450HP) and a metal propeller. These two engines had roughly the same power.

Recently, the author acquired two types of propellers used for Mk1 and Mk2, and conducted detailed measurements of them using a precision measurement device with multiple joints. In this report, the author compares the results of the measurements on the two types of propellers.

Keywords: Wood Propeller, Semi-Fixed Pitch Metal Propeller, Cross Section of Wood Propeller, Design of Hamilton

キーワード：木製プロペラ，半固定式金属プロペラ，木製プロペラの断面，ハミルトンの設計

動機を装備

1. 緒言

昭和6年（1931年）に正式採用になった旧陸軍の中島九一式戦闘機には、最初木製のプロペラが装着されていたが、3年後には新型エンジンとともに金属製に交換されている。このたび、70数年の歳月を越え、両方のプロペラが発見され、同時に詳細な測定、調査をする機会が得られたので、その結果を報告する。

2. 調査の目的

九一式戦闘機には、大別して次の二つの種類がある。
I型：ジュピターVI, VII, VII F, ジュ式450馬力などの発

試作型を除いて固定ピッチ木製プロペラを装着 これは操縦者より見て左回転

II型：九四式450馬力発動機を装備

半固定式金属製プロペラを装着 同右回転

同じ機種でありながら機体によって、プロペラの回転方向が異なるのは稀有な例であり、操縦者にとって大きな危険を伴う可能性を残している。

また、ほとんど性能的に変わりない発動機を用いていながら、木製、金属プロペラを装着したこともまた極めて珍しく、この比較は非常に興味のあるところであり、設計思想、製作の方法など研究の目的は多々挙げられる。

ここでは下記に掲げる4種類のプロペラのうちから②と④について、最新の計測器を用いて精密測定を実施し

*元自動車機器(株)技術部

**日本大学生産工学部教養・基礎科学系助教授

Table 1 Specifications of two types of craft

		Mk1	Mk2
dimensions	wing span	11 m	11 m
	length	7.27 m	7.05 m
	height	3.1 m	2.86 m
	total weight	1530 kg	1534 kg
engine	name	ju-450 hp	type 94 450 hp
	type	air-cooled 9 cylinder radial	air-cooled 9 cylinder radial
	max horsepower	480 hp	495 hp
	max revolution	1775 rpm	2200 rpm
	total capacity	28.7 ℥	24.1 ℥
ability	max velocity	300 km/h	320 km/h
	crusing range	500 km	500 km



Fig. 1 Type91 Fighter Mk1

た。なお①と③の形状ならびに寸法は②と同一である。

Fig. 1 に九一戦の写真を、Table 1 に同機の諸元を示す。

3. 構造ならびにエンジンの概要

九一式は、星型空冷 9 気筒レシプロエンジンを装備した戦闘機で、パラソル翼の単葉機である。まだ複葉機全盛の時代に、パラソル翼の単葉機は斬新な構造であった。胴体は全金属製（ジュラルミン）のセミモノコック構造、主翼の主桁はフランスから輸入したニッケルクロムモリブデン鋼板を鋳組したもの、リブは木製で羽布張り、尾翼はアルミニウム合金の桁に木製羽布張りの機体である。

前述のごとく、この戦闘機には I 型と II 型があり、前者は、イギリスのブリストルジュピターを中島飛行機製作所がライセンス生産した「ジュ450 馬力」エンジンを装備し、後者は、これを手本とした純国産の「九四式 450 馬力」エンジンを装備していた。なお九四式はストロークを小さくして小型化し、回転数を上げて馬力を大きくし

ている。

4. 九一式戦闘機に使われたプロペラ

同機に使われたプロペラには、下記の種類があった事が、最近の資料及び調査から判明した。

I型用

- ① 木製固定ピッチプロペラ
- ② 被包式木製固定ピッチプロペラ（ドイツ・シュワルツ式）
- ③ 金属製調整ピッチプロペラ（アメリカ・ハミルトンスタンダード式）

II型用

- ④ 金属製調整ピッチプロペラ（アメリカ・ハミルトンスタンダード式）

5. 調査したプロペラ

今回当時のままの姿で見つかり調査したものは、I型用の被包式木製固定ピッチプロペラ②およびII型用の金属製調整ピッチプロペラ④である。I型用のプロペラは静岡県護国神社が、II型用のものは、先ほど閉館した東京秋葉原の交通博物館が保管展示していたものである。

Fig. 2 及び Fig. 3 にその写真を示し、Table 2 に諸元を示す。



Fig. 2 Wood Propeller

Table 2 Two propellers types

	Mk1	Mk2
type	covered type	separate type
diameter	2.8 m	2.6 m
pitch	2.52 m (fixed)	2.4 m (R 1.067 m) 2.34 m (R 0.957 m)
material	wood	aluminum-alloy
direction of revolution	left	right
max blade span	0.28 m	0.255 m
manufacturer	NIHON GAKKI co.	NIHON GAKKI co.
sirial No.	No. 476	No. 92
produced date	march 1934 repaired	June 1935



Fig. 3 Metal Propeller

6. プロペラの構造

6.1 I型用被包式木製固定ピッチプロペラ②

一般に木製プロペラは Fig. 4 の如く、10枚～20枚の板を圧着して、一体に成形される。したがって、ピッチは固定である。今回調査した I 型用の木製プロペラも厚さ 20 mm の板を 20 枚積層、そこから削り出されたものである。

使われる材料は一般的にマホガニー、くるみ、さくらなどの堅木材であるが、調査したプロペラには「被包式乙型」と刻印されており、正確な材料は不明である。

この被包式というのは、大正末期から昭和初期にかけてドイツのシュワルツ社で考案された方式で、小石や氷などによる損傷を防ぐため、表面を金網と共にセルロイド被膜などで包んでいる。Fig. 5 は昭和 10 年 5 月所沢飛

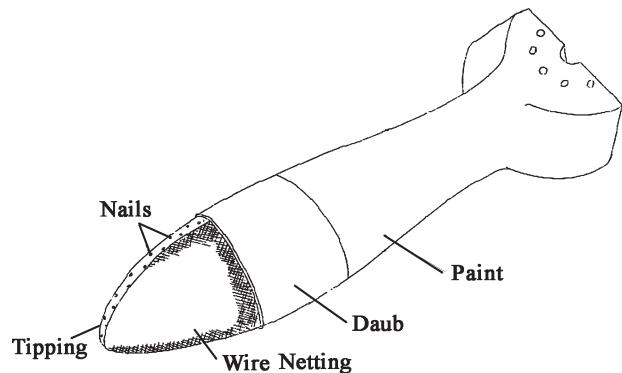


Fig. 5 Tipping and Covering

行学校教育部発行の「被包式乙型プロペラ修理要領」に記載されている略図である。それによると、金網は直径 0.2 mm の黄銅線を使用し、塗料は硝酸纖維素系で約 1 mm の皮膜を被覆したものとの記述がある。また、翼の前縁にはチッピングと呼ばれる厚さ 0.5 mm の黄銅板が木ネジや釘などで貼られている。

6.2 II型用金属製調整ピッチプロペラ

II型用の金属プロペラは、昭和 10 年 1 月陸軍航空本部発行の「九一式戦闘機 II 型説明書」によると、翼の部分と 2 分割されたボスから成っている。ボスの両端には締め付けリングがあり、下のボスに翼体を入れ、シャンク部に取り付けた後、上のボスをかぶせ、この締め付けリングによってブレードを固定する。翼体はシャンク部で回転でき、したがって地上においてプロペラピッチを調整できる。この構造を Fig. 6 に示すが、アメリカのハミルトンスタンダード社で考案されたものである。調査したプロペラもこれとまったく同じ構造であった。使われている材料は、翼体はアルミ合金の鍛造品、ボス部はニッケルクロム合金の鍛造品である。

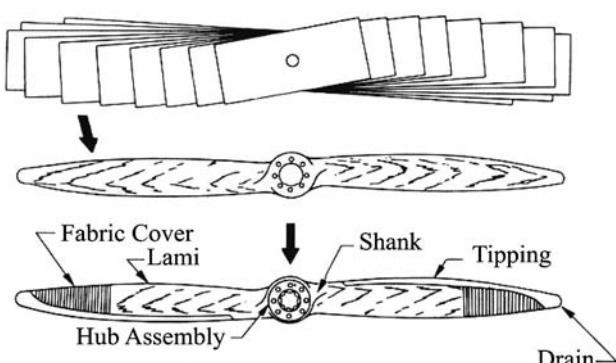


Fig. 4 Structure of Wooden Propeller

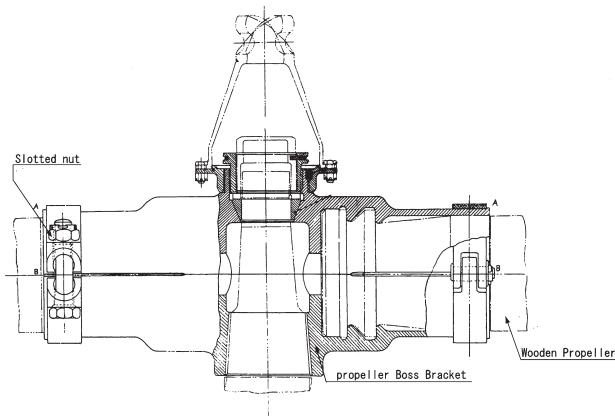


Fig. 6 Propeller Boss of Propeller ④

7. 寸法測定に使用した測定器

今回、プロペラの測定にあたり、翼体の断面形状、ピッチなど翼体の空間座標を得る必要があった。そのため3次元測定器を使用した。これは小坂研究所の多関節3次元測定器で、充分な精度を持つ。主な仕様を下記に示す。

・型式	VMC 5344
・プローブ	VPR 42-75-150
・スタイルス	VST 26-0.4
・繰返し精度	± 0.04
・表示有効桁数	6桁
・測定アーム全長	1550 mm
・自由度	6

Fig. 7 に測定中の写真を示す。



Fig. 7 Measurement of Wooden Propeller

8. 測定結果

8.1 翼断面形状

8.1.1 I型用被包式木製固定ピッチプロペラ

Fig. 8 にその翼断面形状を示す。

8.1.2 II型用金属製調整ピッチプロペラ

Fig. 9 にその翼断面形状を示す。

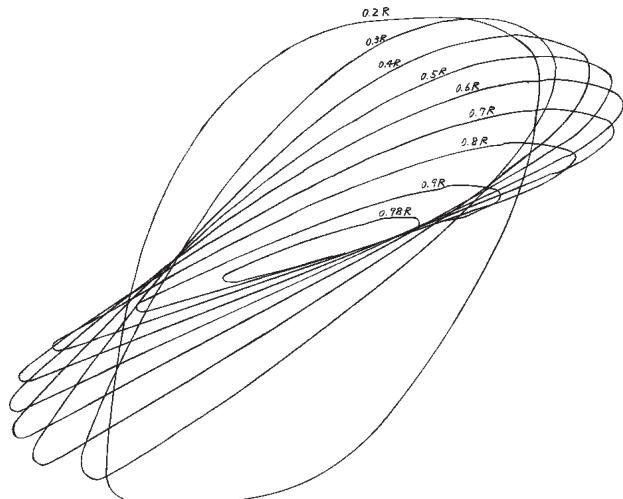


Fig. 8 Cross Section of Wooden Propeller

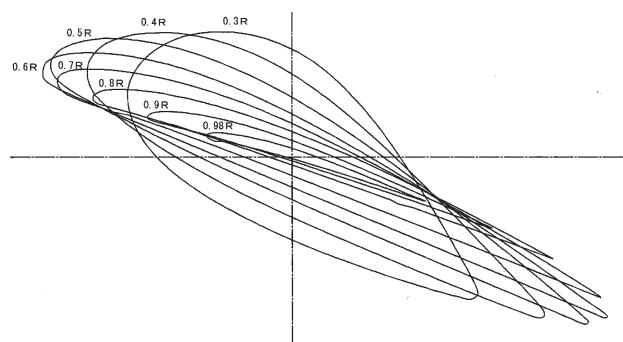


Fig. 9 Cross Section of Metal Propeller

8.2 各断面における羽根角の比較

Fig. 10 に各断面における羽根角を示す。

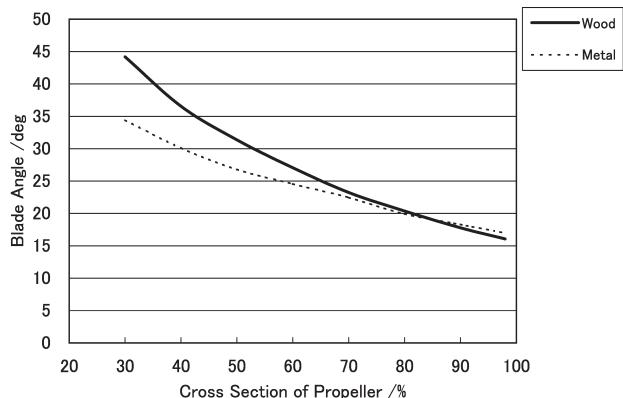


Fig. 10 Comparison of Blade Angle

8.3 各断面における翼厚比

Fig. 11 に I型用、II型用両方の翼弦に対する翼厚比のグラフを示す。

翼厚比のデータは3次元測定器で測定、解析、作図したFig. 8 及び Fig. 9 より読み取ったデータを示したものである。

8.4 ピッチの実測値

Fig. 12 に各断面のプロペラピッチの実測グラフを示

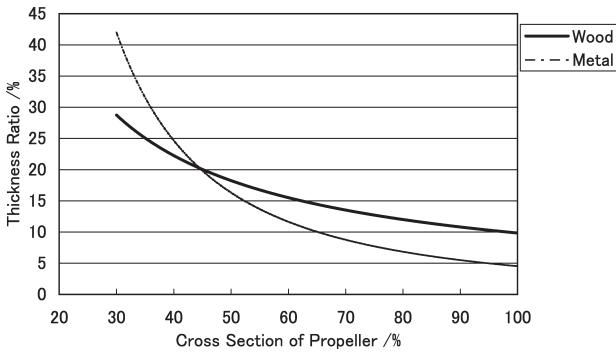


Fig. 11 Relation between Thickness Ratio and Cross Section

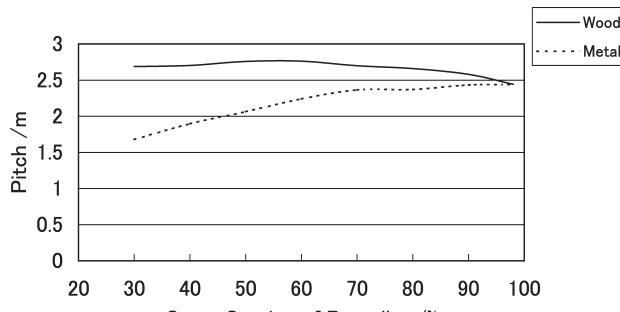


Fig. 12 Comparison of Pitch

す。

このデータは前項と同じく Fig. 8 及び Fig. 9 より読み取ったピッチデータをグラフ化したものである。これからわかるように、I 型のプロペラでは、先端でピッチをわずかに小さくしていることがうかがえるが、製作誤差や測定誤差を考えると、各断面でピッチを変えているとは思えない。

これに対して、II 型では明らかに中心に近い断面から先端に行くにしたがってピッチが大きくなっている。不等ピッチ分布プロペラであることが判明した。

8.5 プロペラの各断面における迎角

Fig. 13 は I 型のプロペラ翼断面形状から読み取った迎角を、飛行速度をパラメータとして、流入空気に対する迎角を示したものである。Fig. 14 は同じく II 型のものである。

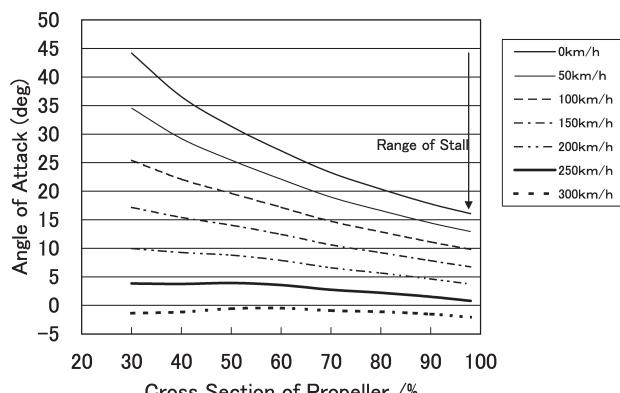


Fig. 13 Angle of Attack at Propeller ②

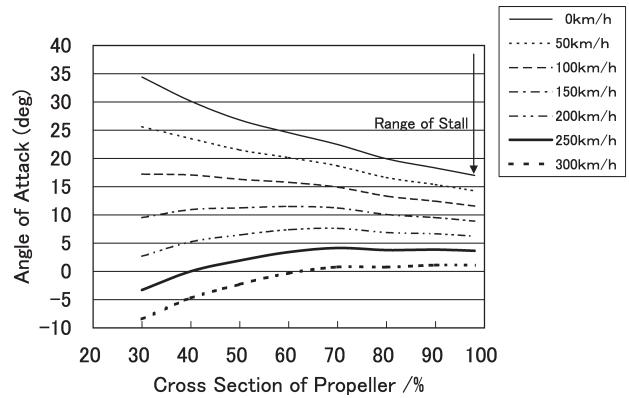


Fig. 14 Angle of Attack at Propeller ④

固定ピッチプロペラは飛行速度、回転数によって、各断面における気流に対する迎角は大きく異なる。

離陸時や飛行速度が低い時には、ブレードの一部が失速状態になり、効率が著しく低下する。

9. 考察

9.1 プロペラの翼型について

プロペラの翼型については各断面で厚さが異なり、翼型を特定することはできないが、Fig. 8 と Fig. 9 に見られるところより I 型用の木製プロペラと II 型用の金属プロペラとでは明らかに異なる翼型を使っている。これは単に木製と金属製の強度の相違だけではなく、翼型に対する設計技術の進歩から来る差である。すなわち、当時の日本のプロペラ設計、製作技術はすべて欧米の技術に頼っていたといつても過言ではない。II 型用プロペラを製造したのは日本楽器（現ヤマハ）であるが、すでに住友金属がアメリカのハミルトンスタンダード社から製造権を得た技術を使って生産していたので、このプロペラの設計もハミルトンスタンダード社によっている。

9.2 木製プロペラと金属製プロペラの羽根角比較

Fig. 10 にあるように、両者の羽根角の分布には明らかに違いがある。すなわちプロペラ羽根の付け根に近いところでは II 型の方が小さく、先端ではほぼ同じである。これは両者のピッチ分布に差があることを表している。

9.3 木製プロペラと金属製プロペラの翼厚比較

プロペラの翼弦長に対する翼厚の比は、Fig. 11 にあるように木製と金属製のプロペラとでは大きく異なっている。

その理由としてプロペラは、0.4 R 以下の個所では推進力にほとんど寄与しないこともあり、金属製プロペラは、遠心力による引張り強度やねじれ強度を重視し、断面を円形に近い形状にしている。そしてプロペラの効率に寄与する 0.5 R 以上の断面では翼の厚さを薄くして効率の向上を図っている。こうした断面設計は、現在のプロペラにも当てはまる技術である。

9.4 翼断面におけるピッチ分布

固定ピッチプロペラのピッチは、単純なだけに飛行機の性能に及ぼす影響が大きい。エンジンの馬力、回転数、トルク特性、機体の速度などとの関連が深く、その値を決めるにあたっては、何種類かのピッチの異なるプロペラを作り、実験によって決めていたはずである。II型のプロペラはピッチを調整できる機構のため、この点からは大変有利であった。

さらにブレードの各断面でピッチを変えることは、複雑な要素が絡み合い詳細な実験を繰り返す必要がある。このII型の金属プロペラは、付け根に近いところから先端に行くにしたがってピッチを大きくしており、ブレードの各断面でピッチを変える不等ピッチ分布プロペラである。この理由は、九一式戦闘機は直径の大きな星型空冷エンジンを使っており、飛行中における空気の流れがエンジン部分とそれ以外とでは大きく異なるため、風洞実験などにより空気流に合わせてピッチを変えたものと考えられる。

9.5 固定ピッチプロペラの失速と効率

固定ピッチプロペラでは、一番多く使われる速度に合わせたピッチに設定する必要がある。したがって、離陸時や低速飛行時にプロペラの回転数を上げた場合には、ブレードは失速状態になってしまい、効率は大幅に低下してしまう。

Fig. 13 および **Fig. 14** にあるように I 型、II 型とも機体が停止状態ではブレードのほとんどの範囲が失速状態であり、プロペラ効率は良くない。

飛行速度が離陸速度と思われる 100 km/h を超えると、I 型では失速範囲は約 1/2 以下になり効率は良くなってくるが、II 型ではエンジンの回転数が高い分 100 km/h でも失速範囲は約 40% 程度ある。

一方、飛行速度が 300 km/h を超えると、I 型では全ての範囲でマイナスの迎角になってしまい、II 型ではまだ主要範囲でプラスの迎角を保っており、揚力（プロペラ推力）を期待できる状態である。

9.6 飛行性能に及ぼす影響

I 型と II 型はエンジンが多少異なり、両者の飛行性能にプロペラの違いがどれだけ影響したかについて論ずるには困難な面がある。しかし推測を含めて考察してみよう。

まず両者に使用されているエンジンを比較してみると、**Table 1** にあるように両者の馬力はほぼ同じであるが排気量は I 型の方が大きい。したがって、出力トルクは I 型の方が大きいと思われる。

当時の陸軍資料（昭和 9 年 6 月 21 日発行航密第 419 号）によると、II 型試験飛行の結果、低空での上昇性能は I 型の方が良いが、高度が 3000 m 以上では II 型の方が優れている。また、最大速度も高度 3600 m で 320

km/h と、I 型より 20 km/h 速くなっている。排気量が小さく、トルクが小さいエンジンでもこれだけの性能の差が出る原因是、両者の与圧機（スーパー・チャージャー）の性能に差がないと仮定したら、プロペラの効率の差と言えるのではないだろうか。

現在では定速ピッチや可変ピッチプロペラの存在を知っているが、それらの技術がなかった時代、固定ピッチプロペラとしての性能には限界があったと言える。

9.7 II 型用の調整ピッチについて

II 型のプロペラは調整ピッチプロペラであるが、当時の資料を見ても、運用上どのように使用したかについての記述がない。

取り扱い上も ± 6 度の範囲で調整できるように刻印が打ってあるが、取り扱い説明書にはすべて 0 の位置にセットすることとなっている。

調整ピッチプロペラは試験飛行時、最適なピッチを求めるには便利であり、固定ピッチのように異なるピッチのプロペラを何本も試作する必要がない。しかし、ただそれだけのために使ったのだろうか。迎撃用の機体には離陸性能や上昇性能を向上させるため、ピッチを小さくセットしておき、反対に最大速度を重視した機体にはピッチを大きくしておくなどの使い方が考えられるが、そのような運用方法を記述した資料は見つかっていない。

10. 今後の検討事項

4 項において述べたように、九一式戦闘機 I 型には金属製調整ピッチプロペラも存在していたことが、当時の資料により明らかになっているが、この詳細は不明である。

また、試作機には金属製のプロペラが使われていたという説があり、数少ない写真で見ると確かに金属製のプロペラのようでもある。しかし構造も製造方法も II 型のものとはまったく異なるものであり、資料も見つかっていないことから今後の研究課題としたい。

なお、中島九一式戦闘機学術調査プロジェクトでは、製造番号 42 の①型プロペラを入手している。このプロペラの状態は非常によく、ジュピター IV 型エンジンに装着した上で展示することを考えている。

謝辞

最後に、今回の測定に際し、プロペラを貸し出していただいた交通博物館、静岡県護国神社、および精密な測定をしてくださった株式会社小坂研究所に対し厚く御礼申し上げます。

（H 18. 8. 2 受理）