＝ 技 術 ノ ー ト ＝ TECHNICAL NOTE

プロペラの最適基本計画法^{*1} Fundamental Optimal Planning of Propeller

安 東 茂 典^{*2}・衣 川 摂 哉^{*3}
Shigenori ANDO and Setsuya KINUGAWA

Key Words: Propeller, Automatic Design, Design Point, Personal Computer

Abstract

A method of rapid automatic "optimal" design of a propeller combined to an engine is presented for unducted cases. The whole data, such as diameter, blade pitch angle, blade number, rotational speed, and practical propulsive efficiency are determined, for various design points. Use of a personal computer is suitable for this method.

1. 序 論

筆者らはこれまでに、各種プロペラのエンジンに結合された状態における空力特性の、迅速自動計算法を提出してきた(文献 1～5)。今回提出するものは、「最適」設計点^{*4}(静止状態を除く)に絞る代りに、より大量のデータをよりコンパクトに与えることを目的とする。

“最適”と題した理由を初めに述べておく：

第 1 図の η_{CP} 曲線上の計算に絞られるからである。なおこの図は実験結果の集大成であるから、これに基づく本方法は初めから検証済みであると言える。

既提出のものは、第 1 図で言うならば、その全域に及ぶ。あるいは静止状態を含む全速度域にわたるものであった。したがって、今回のものは、その目的も方法も全く異なる。ただ共通しているのは、チャートの使用などと決別しパソコンを用いて計算を行えるようにすることだけである。いまや図から目視の内挿に頼るような時代ではない。似ていることに数表がある、表示の間に来た時「比例部分の原理」を用いるのは、煩わしい。これが数表が廃れた最大原因である。プロペラ性能のチャート計算もそれに似ている。

この方法は、3 ブレード、かつ 1 ブレード当たり $AF=120$ のプロペラの性能図から出発している。

これもまたチャートであると言う人があるかもしれない。しかし従来のチャートとは全く別種である。さらには出発だけはチャートかもしれないが、FORTRAN PROGRAM による計算作業では全くチャートに触れなくて良い、という点が従来のチャート法とは全く違う 目視の内挿から完全に決別している。

それに基づいて任意ブレード数を持つプロペラの“最適”点を出来る限り精度良く扱おうとするもの。ブレード数が 3 に近ければ良いが、大幅に違う場合には、ブレード間相互干渉損失が異なるため計算結果が幾らか違って来る可能性がある。それを補正する方法をも考案した。これは第 2 図に基づいている。しかし補正量はごく僅かである。だから補正方法は直感的な荒っぽい近似でよいと考えられる。勿論一番いいのは、出発点において使用した性能図として、3 以外の各種ブレード数のものを入手しておき、出来るだけブレード数の近い性能図から、同様の方法で出発することである。補正はあくまで補欠的なものであり、しかも量的にも微少である。

主 な 記 号

a : 空気中の音速 m/s
 C_P : パワ係数
 C_{P1} : 1 ブレード当たりのパワ係数
 C_T : 推力係数
 C_{T1} : 1 ブレード当たりの推力係数
 D : プロペラ直径 m
 J : 進行率 V/nD
 M : 飛行マッハ数
 M_T : プロペラ先端のマッハ数
 $\bar{M}$: 同上制限値

^{*1} 平成 5 年 2 月 23 日原稿受理

^{*2} 徳島文理大学工学部

^{*3} 石黒国際特許事務所

^{*4} この“最適”は、古典理論のそれを意味せず、実用的・経験的方法でのそれである。

が求められる。ついで、 $J > J_{\min}$ なる J の値を仮定すると、第1図によって η_{OPT} , $\beta_{0.75}$, C_P (全プロペラの) の値が読み取れる。したがって、式(4)の右辺の値は全て既知となる。ここでもしも、 $m=2, 3, 4, \dots$ とすれば、対応する D の値が知られる。その時はプロペラ回転数は

$$n = V/JD \quad (7)$$

から求められる。

J の値は、 $J_{\min}$ より大でさえあれば良いので一連の $J; m, D, n, \eta, \beta_{0.75}$ (8)

という解がえられることになる。

この中から好きな組を選べば良い。

例えば、大きい D は長い脚を要する。

n がエンジンの回転数とひどく違くと減速装置が大がかりになる。

そのほか、小型機では、 $m=2$ が製作上好ましかろう。

全ての場合に、高い η が好ましい

このどれかに重点を置いて選択することになる。

3. ブレード間相互干渉についての考慮

これについての概念を得るために文献7)から第2図を引用する。相互干渉は大層小さく、枝葉末節的である。しかしこの程度の違いでも補正できるものならしたほうがよからう。また補正は C_{T1} , $C_{P1} < 0.05$ の線形部分に重点を置く。これは“最適設計”という本論文の目的と矛盾しないであろう。以下の記述はその程度の意味で記述する。

同 a, b 図からわかるように、ブレード数、および C_{P1} , C_{T1} が大きいほど(ほぼリニアに)干渉が増している。かつその大きさは $C_{T1}=0.05$ のあたりで約半目盛(つまり 0.025)である。よって我々は近似的に次式のように定量化することを提案する。

$$“C_{T1} \text{ loss}” = 0.025 * (C_{T1}/0.05) * (m-2) \quad (9a)$$

C_{P1} もほぼ同程度である。一方 η については、この 1/3 程度に見える。即ち

$$“\eta \text{ loss}” = “C_{T1} \text{ loss}”/3 \quad (9b)$$

実際の FORTRAN PROGRAM で用いたものは、これらを基本とし、幾分修正している。

例えば、 $m=3$ が基準になっているので、(9a)式の最後の因子は $(m-3)$ になる。すると $m=2$ の場合には、相互干渉損失が負、つまり、 $m=3$ の場合よりも良い性能になる。しかし、安全側の設計をとることにして、 $m=2$ の場合の損失は $m=3$ の場合と同一とした。

4. 数値計算のフローチャート

第3図に数値計算のフローチャートを示す。この中において相互干渉はさほど重要でもないので直感的な補正式で処理した。まず

$$G = (1/2) \sqrt{(C_{T1}/0.05)^2 + (C_{P1}/0.05)^2} * (m-3) \quad (10)$$

を定義する。この式の考え方について少し説明する。

イ) 干渉損失は C_{T1} と C_{P1} 値が大きいほど大。それぞれの 0.05 あたりでの干渉損失は同程度である。この両者に依存せしめたほうが安全と思う。

ロ) 第1図は $m=3$ に関するものである。よって $m > 3$ の場合への補正を行うことにした。

ハ) 式(10)の各項が 0.05 で割られているのは、1 ブレード当たりの $C_{T1}=C_{P1}=0.05$ での干渉度を基準にしたいからである。

そして、

$$P \text{ と } T \text{ には, } (1 - 0.025G) \quad (11a)$$

$$\eta \text{ には, } (1 - 0.025G/3) \quad (11b)$$

第3図 本計算法に関するフローチャート

という損失係数をかけた。

かくして、 $C_{T1}=C_{P1}=0.05$ の時

$$dG/dm=1$$

そしてこの時 P, T, η の 1 ブレード増加による損失は

$$dP \text{ loss}/dm=0.025 \text{ etc.}$$

$$d\eta \text{ loss}/dm=0.025/3$$

である。これらは式(9)とも第2図とも矛盾していない。

5. 数値計算結果とその考察

FORTAN PROGRAM の DATA 文の中の最初の 4 行では、第1図の 1 点鎖線“最適”推進効率曲線上の一連の点での各物理量を、12 要素の配列で示す目の子で内挿補間したので、精度には必ずしも最良とは言えない。しかしこれを用いて得られた最終結果は後述のように満足に見える。ここで

序論で述べた「チャートの目視内挿からの決別」

が残っている、と思われる読者があるかもしれない。しかしこの図を何時までも使う限り目視内挿を絶えず繰り返さなければならない。本論文を用いれば、目視内挿を FORTRAN PROGRAM 作成時のただ 1 回に限定される。

ブレード枚数を幾つまで計算するか、ここでは 6 にしている。

計算例は、2 つ選んだ。その 1 つは、零戦を想定したもの、他は水面飛行機である。即ち

P (馬力) 速度 (km/h) 高度

第 1 例 1000 500 海面上

第 2 例 100 100 海面上

を入力した。お断りしておくがこの水面飛行機は、超小型のレジャー・スポーツ用であって、輸送用ではない。

第 1 及び 2 例の計算結果をそれぞれ第 4 及び 5 図に示す。曲線に付けられたラベル $\square, \triangle, \dots$ は出力した J 値の違いを示し、それぞれに 1 つの β 値が対応して

J	$\square$	$\circ$	$\triangle$	$+$	$\times$	$\diamond$
	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00

第 4 図 第 1 計算例：零戦をモデルとし、 $n_e=3000$ rpm と仮定した

第5図 第2計算例：レジャー用の水面飛行機をモデルとし、 $n_E=6000$ rpm と仮定した

いる。曲線の数が最初に与えた配列要素数より少ないのは、 $J > J_{min}$ だけが残ったからである。

第1例の場合には、変化の度合いが穏やかである。推進効率、出力された殆ど全ての場合に、非常に高い。なお、減速比をも示してあるが、これは、エンジンの回転数(これは、計算には本質的に無関係)を仮定したからである。第1例ではそれを3000 rpm とした。ブレード枚数が減ると、直径が大きくなる。回転数は下がり、強い減速を要する。ブレード枚数が増すと、その逆になることと、加えて、推進効率が少し下がる。しかし、上述のように変化は穏やかなので設計は比較的楽である。

これに対し第2例では、多分直径を2 m 以下に抑えたいであろうのに、それに叶うのは曲線 $J=0.30$ と 0.50 の一部だけである。しかし皮肉にもそれらの推進効率、出力部分の中の最低部分である。したがって、設計者は、プロペラの設計に大層苦労し、それにも拘らず良い結果は得られない。ライト兄弟の初飛行した機体のプロペラ推進効率が約60%だというのが、たと

え今日の技術をもってしても大差はなかろう。なお、第2例における減速比を計算するに際しては、エンジン回転数を6000 rpm と仮定した。

6. 結 論

エンジンに結合されたプロペラの“最適”迅速自動設計法を提出した。“最適”の意味は第1図の η_{OPT} 曲線上の計算のみが行われるからである。

- 1) チャートから出発してはいるが、全く別種のチャートである。
- 2) 従来のチャートを用いる時の目視内挿などの煩わしさは、計算作業段階では一掃された。
- 3) “最適”状態の計算に絞られている。

ブレード間の相互干渉損失は微小であるが、経験的方法で組み入れた。

つまり本方法の基本は第1図にあり、これが実験結果であるから、検証は自ずからなされている。相互損失補正もまた別の実験結果に基づく、しかし全体の精度に及ぼす効果は枝葉末節的である。

零戦と超小型水面飛行機を考慮した2例の計算結果を示した。後者の場合には、十分なプロペラを設計する—60~70%以上の推進効率を実現する—のは難しだろう。

参考文献

- 1) 安東茂典, 加藤三千代: エンジンに結合されたプロペラ性能の迅速自動計算法, 日本航空宇宙学会誌, 39 (1991), pp. 294-302.
- 2) 安東茂典, 加藤三千代: PAR-WIGの離水性能の予測法, 日本航空宇宙学会誌, 39 (1991), pp. 666-674.
- 3) 安東茂典, 加藤三千代: ダクト無し定速プロペラ性能の迅速自動計算法, 日本航空宇宙学会誌, 39 (1991), pp. 675-679.
- 4) 安東茂典, 加藤三千代: ダクテッド・プロペラ性能の迅速自動計算法, 日本航空宇宙学会誌, 40 (1992), pp. 302-308.
- 5) 安東茂典, 衣川撰哉: エンジンに結合されたダクテッド・プロペラ性能の迅速自動計算法, 日本航空宇宙学会誌, 41 (1993), pp. 148-155.
- 6) 日本航空宇宙学会編: 航空宇宙工学便覧, 丸善, 1974, 図9.74.
- 7) 日本航空学会: 航空工学便覧, 1940, p. 562, 第9, 10, 11図.

APPENDIX FORTRAN PROGRAM 中の記号

AS: 大気中の音速

BIFCT: プロペラ相互間の損失係数, ただし, 推力に関するもの

BIFCY: 同上, ただし, 推進効率に関するもの

CP: 全ブレードのパワ係数

CP1: 1ブレード当たりのパワ係数

CT: 全ブレードの推力係数

CT1: 1ブレード当たりの推力係数

D: プロペラ直径

ERPM: エンジンの毎分回転数

F: 式(4)の右辺の量

G: 式(10)で定義される

MB: ブレード枚数

M: ピークルの前進速度マッハ数

RMT: プロペラ先端のマッハ数

ROW: 空気の密度

PRPS: プロペラの毎秒回転数

PRPM: プロペラの毎分回転数

RGR: プロペラ回転数/エンジン回転数

T: 推力

YYTA: “最適”実用推進効率