

1. 目的

コップを使って簡単に製作できるゴム動力飛行機用のプロペラブレードを設計する解析ツールを作成する。

目次

1.	目的.....	1
2.	参考資料.....	2
3.	等ピッチプロペラの簡易製作法.....	3
3.1	等ピッチプロペラ.....	3
3.2	任意のピッチ比を持つプロペラの簡易製作法.....	3
4.	円錐面から切り出したプロペラブレードのねじれ角度変化の解析.....	5
4.1	解析の考え方.....	5
4.2	計算式.....	6
4.2.1	円錐台の半径が小さい側をプロペラ軸側とする場合 6	
4.2.1.1	展開図から円錐への座標変換.....	6
4.2.1.2	ブレードの座標変換.....	7
4.2.2	円錐台の半径が大きい側をプロペラ軸側とする場合 10	
4.2.2.1	展開図から円錐への座標変換.....	10
4.2.2.2	ブレードの座標変換.....	11
5.	キャンバーの大きさの計算式.....	14
5.1	円錐台の半径が小さい側をプロペラ軸側とする場合.....	14
5.2	円錐台の半径が大きい側をプロペラ軸側とする場合.....	16
5.3	キャンバーの大きさ.....	18
6.	解析ツールとその検証.....	19
6.1	MS-Excel のワークシート.....	19
6.2	円筒の場合の検証.....	22
6.3	円錐の場合の検証.....	22
6.3.1	円錐の場合の検証 1.....	22
6.3.2	円錐の場合の検証 2.....	23
6.4	清水和夫氏の設計例の検証.....	23

2. 参考資料

- [1] M. Chernoff, "Form for Bent Propellers," 1964-65 Model Aeronautic Year Book, Edited by Frank Zaic, Model Aeronautic Publications, 1965, pp. 198-200.
- [2] "Paul and Ralph Bradley's Model Airplane Page," <http://www.parmodels.com/Plans/nocals.htm>.
- [3] "Model Airplane No Calorie Foam Cessna Bird Dog Tutorial Build," インドネシアの Hobi Cerdas の Youtube, #hobicerdas #pesawattenagakaret #cessna.
- [4] J. Maxwell, "Props from Cans without Calcs -- Taken from Norwind News, October 1994 #23 and Decmeber 1994 #24," Indoor News and Views, Issue #121, Spring 2007.
- [5] J. Barker, "Can Formed Propellers -- Taken from Norwind News, October 1994 #23 and Decmeber 1994 #24," Indoor News and Views, Issue #121, Spring 2007.
- [6] F. Rash, "Bucket Props," Indoor News and Views, Issue #121, Spring 2007.
- [7] NAZCA-TR-22-010 「PET ボトルを使ったゴム動力飛行機用プロペラの設計」
- [8] 清水和夫「小型プロペラ シミズ流円筒巻付法, 理屈コース」, CFFC News, 2004年5, 6月号.
- [9] 清水和夫「小型プロペラ シミズ流円筒巻付法, 理屈コースの補足」, CFFC News, 2004年7, 8月号.

3. 等ピッチプロペラの簡易製作法

3.1 等ピッチプロペラ

プロペラの翅（ブレード）はその効率を良くするためにねじれている。プロペラが1回転したとき、中心から r の位置にある翼素の翼角度 α に沿って進んだ距離をピッチ P という。すべての半径においてピッチが等しいプロペラを等ピッチプロペラといい、模型飛行機で普通に用いられている（図 3-1）。

ピッチ比と翼角 β の関係は次のように表される。

$$\tan \beta = \frac{P}{\pi r} \rightarrow \frac{P}{r} = \pi \tan \beta$$

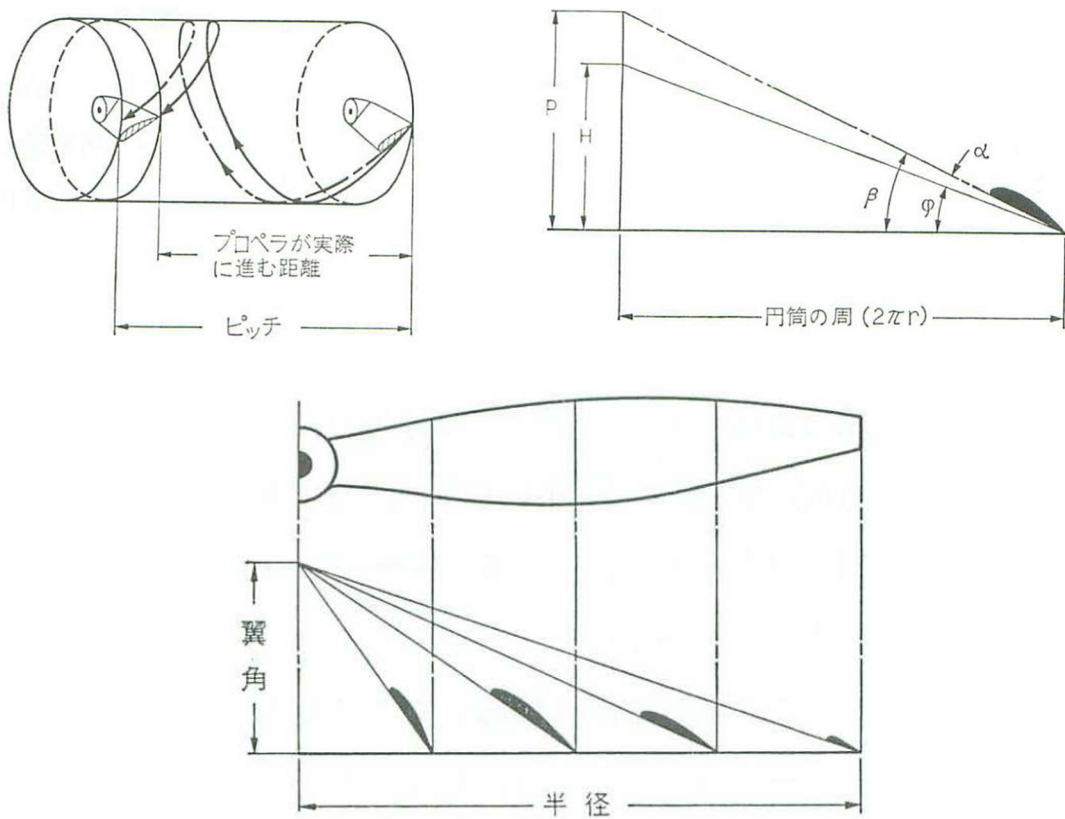


図 3-1 等ピッチプロペラ

3.2 任意のピッチ比を持つプロペラの簡易製作法

プロペラを製作するには、バルサ材のブロックから削り出すのが普通であるが、非常に手間がかかる。簡単に製作するには、円筒や円錐形のボトル、空き缶、紙コップからブレードを切り出す方法がある（図 3-2）。ブレードの中心線を円筒（または円錐）の軸から傾けることにより、ブレードにねじれを付けるのである。

清水和夫氏は、翼弦中心点を基準軸からずらすことによって任意のピッチ比のプロペラブレードを製作する方法を発表している（参考資料[8], [9]）。しかし、詳しい計算式は不明であ

り，その精度は実証されていない。

本レポートでは，円錐面を使って製作したプロペラのブレードの翼角の厳密な計算式を導出し，解析ツールを作成した．この解析法の精度を検証した．清水氏が設計したプロペラブレードの精度も検証した．

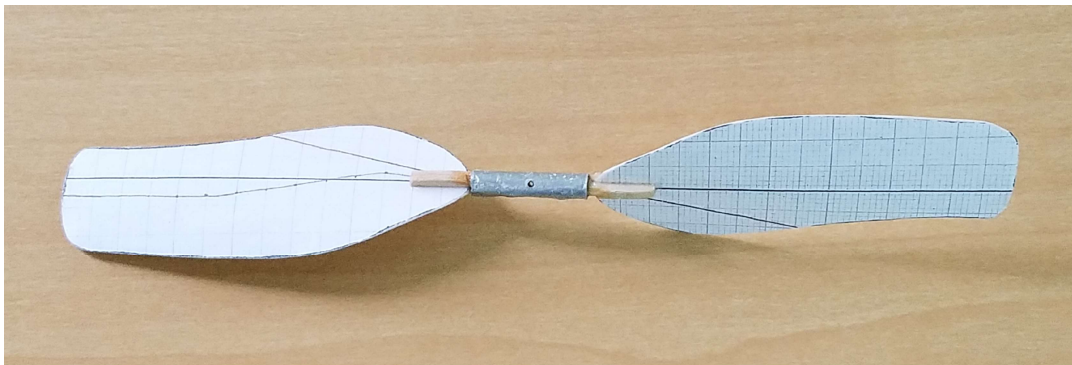
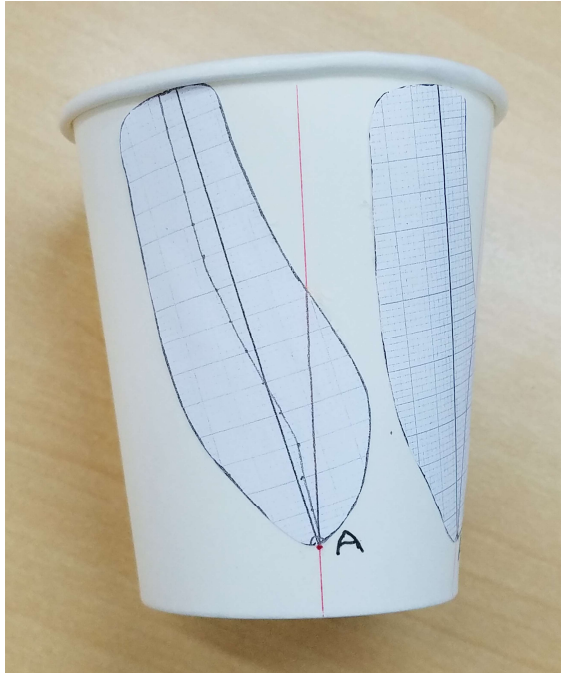


図 3-2 紙コップから切り出して製作したプロペラ

4. 円錐面から切り出したプロペラブレードのねじれ角度変化の解析

4.1 解析の考え方

図 4-1 に示すように、円錐上のコップの母線上にブレードの根本の点である A 点をとる。A 点を通る円錐の母線から角度を持った線を引き、その線をブレード基準線とする。ブレード基準線は展開図上で直線であるとする。ブレード基準線から左に離れた C 点を取り、この点がブレード翼弦の中心線上にあるとする。左方が前縁であるとする。A 点と C 点上の法線を考える。これらの法線を見ると、角度がついており、ブレードがねじれていることがわかる。

図 4-2, 図 4-3 に展開図を示す。この円錐の展開図にブレードを描く。ブレードの基準線は展開図上で直線である。ブレードの始点を A 点とし、A 点がブレードとハブの結合点になっている。ブレードの基準線は円錐の母線に対して角度 θ 傾いているとする。A 点を基準点とし、展開図上で A 点から基準軸上で s だけ離れた点を B 点とし、さらに基準線から t だけ離れた C 点にブレードの翼素の中心点があると考え、A 点と C 点の展開図上の座標と、円錐上の座標を求め、さらに、C 点における円錐表面の法線ベクトルを求める。この法線ベクトルから翼角を求めることができる。

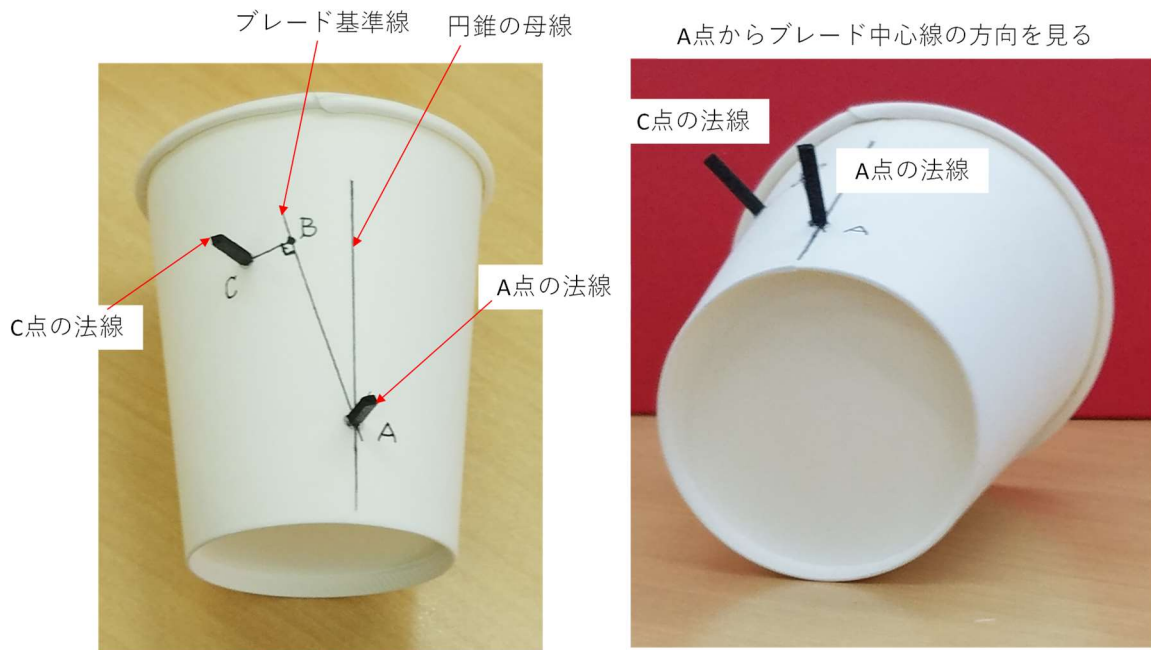


図 4-1 円錐表面上のブレードの翼素の中心 C 点とその位置での法線

4.2 計算式

4.2.1 円錐台の半径が小さい側をプロペラ軸側とする場合

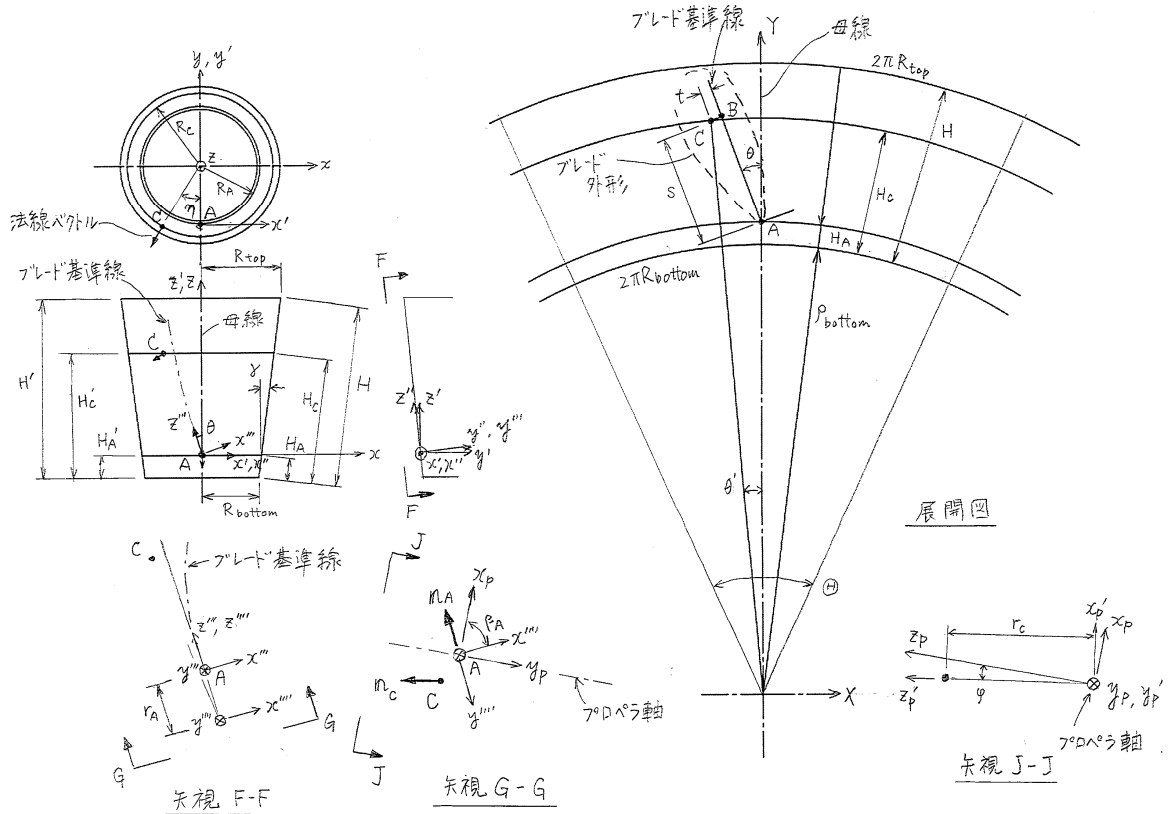


図 4-2 展開図と座標系の定義 - 円錐台の半径が小さい側をプロペラ軸側とする場合

4.2.1.1 展開図から円錐への座標変換

図 4-2 の寸法の計算式を導くと

$$\gamma = \sin^{-1} \frac{R_{top} - R_{bottom}}{H}$$

ここで、 R_{top} は円錐台の開いている方の半径、 R_{bottom} は円錐台のすぼまっている方の半径。したがって、 γ は正。

$$H' = H \cos \gamma$$

$$H'_A = H_A \cos \gamma$$

$$\frac{R_{top}}{R_{bottom}} = \frac{\rho_{top}}{\rho_{bottom}} = \frac{\rho_{bottom} + H}{\rho_{bottom}} \rightarrow \rho_{bottom} = \frac{H}{\frac{R_{top}}{R_{bottom}} - 1}$$

$$\theta = \frac{2\pi R_{bottom}}{\rho_{bottom}}$$

$$R_A = \frac{\rho_A \theta}{2\pi} = \frac{(\rho_{bottom} + H_A) \theta}{2\pi}$$

A 点の X-Y 座標成分は

$$\begin{pmatrix} X_A \\ Y_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \rho_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \rho_{bottom} + H_A \end{pmatrix}$$

B 点の X-Y 座標成分は

$$\begin{pmatrix} X_B \\ Y_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_A - s \sin \theta \\ Y_A + s \cos \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -s \sin \theta \\ s \cos \theta + \rho_{bottom} + H_A \end{pmatrix}$$

C 点の X-Y 座標成分は

$$\begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_B - t \cos \theta \\ Y_B - t \sin \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -s \sin \theta - t \cos \theta \\ s \cos \theta + \rho_{bottom} + H_A - t \sin \theta \end{pmatrix}$$

H_C , H'_C , R_C は

$$H_C = \rho_C - \rho_{bottom} = \sqrt{X_C^2 + Y_C^2} - \rho_{bottom}$$

$$H'_C = H_C \cos \gamma$$

$$R_C = \frac{\rho_C \theta}{2\pi} = \frac{(\rho_{bottom} + H_C) \theta}{2\pi}$$

A 点と C 点を x-y-z 座標系で表すと

$$\begin{pmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -R_A \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R_C \sin \eta \\ -R_C \cos \eta \\ H'_C - H'_A \end{pmatrix}$$

ここで,

$$\eta = \frac{\rho_C \theta'}{R_C} = \frac{(\rho_{bottom} + H_C) \theta'}{R_C}, \theta' = \tan^{-1} \left(-\frac{X_C}{Y_C} \right)$$

A 点と C 点における法線ベクトルを x-y-z 座標系で表すと

$$\begin{pmatrix} n_{x,A} \\ n_{y,A} \\ n_{z,A} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\cos \gamma \\ -\sin \gamma \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} n_{x,C} \\ n_{y,C} \\ n_{z,C} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \eta & \sin \eta & 0 \\ -\sin \eta & \cos \eta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ -\cos \gamma \\ -\sin \gamma \end{pmatrix}$$

4.2.1.2 ブレードの座標変換

A 点と C 点を, x-y-z 座標系の原点を A 点に平行移動した x'-y'-z' 座標系で表すと

$$\begin{pmatrix} x'_A \\ y'_A \\ z'_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x'_C \\ y'_C \\ z'_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R_C \sin \eta \\ -R_C \cos \eta + R_A \\ H'_C - H'_A \end{pmatrix}$$

x' - y' - z' 座標系を x' 軸まわりに γ 回転させた x'' - y'' - z'' 座標系で表すと

$$\begin{pmatrix} x''_A \\ y''_A \\ z''_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x''_C \\ y''_C \\ z''_C \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & \sin \gamma \\ 0 & -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x'_C \\ y'_C \\ z'_C \end{pmatrix}$$

A 点と C 点における法線ベクトルを x'' - y'' - z'' 座標系で表すと

$$\begin{pmatrix} n_{x'',A} \\ n_{y'',A} \\ n_{z'',A} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & \sin \gamma \\ 0 & -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{pmatrix} n_{x,A} \\ n_{y,A} \\ n_{z,A} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} n_{x'',C} \\ n_{y'',C} \\ n_{z'',C} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & \sin \gamma \\ 0 & -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{pmatrix} n_{x,C} \\ n_{y,C} \\ n_{z,C} \end{pmatrix}$$

x'' - y'' - z'' 座標系を y'' 軸まわりに $-\theta$ 回転させた座標系で表すと

$$\begin{pmatrix} x'''_A \\ y'''_A \\ z'''_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x'''_C \\ y'''_C \\ z'''_C \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x''_C \\ y''_C \\ z''_C \end{pmatrix}$$

A 点と C 点における法線ベクトルを x''' - y''' - z''' 座標系で表すと

$$\begin{pmatrix} n_{x''',A} \\ n_{y''',A} \\ n_{z''',A} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} n_{x'',A} \\ n_{y'',A} \\ n_{z'',A} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} n_{x''',C} \\ n_{y''',C} \\ n_{z''',C} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} n_{x'',C} \\ n_{y'',C} \\ n_{z'',C} \end{pmatrix}$$

プロペラ軸が図 4-2 の矢視 F-F に示すように、A 点から z''' 軸のマイナスの方向に r_A 離れているとすると、この新しい x'''' - y'''' - z'''' 座標系で A 点、C 点の座標を表すと

$$\begin{pmatrix} x''''_A \\ y''''_A \\ z''''_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ r_A \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x''''_c \\ y''''_c \\ z''''_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x'''_c \\ y'''_c \\ z'''_c + r_A \end{pmatrix}$$

矢視 G-G に示すように、A 点における翼角が β_A となるようにプロペラ軸 y_p をとると (z''' 軸まわりに $-\beta_A$ 回転)、プロペラ軸座標系 $x_p-y_p-z_p$ の座標成分は

$$\begin{pmatrix} x_{p,A} \\ y_{p,A} \\ z_{p,A} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta_A & -\sin \beta_A & 0 \\ \sin \beta_A & \cos \beta_A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x''''_A \\ y''''_A \\ z''''_A \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x_{p,C} \\ y_{p,C} \\ z_{p,C} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta_A & -\sin \beta_A & 0 \\ \sin \beta_A & \cos \beta_A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x''''_c \\ y''''_c \\ z''''_c \end{pmatrix}$$

A 点と C 点における法線ベクトルを $x_p-y_p-z_p$ 座標系で表すと

$$\begin{pmatrix} n_{xp,A} \\ n_{yp,A} \\ n_{zp,A} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta_A & -\sin \beta_A & 0 \\ \sin \beta_A & \cos \beta_A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} n_{x''''_A} \\ n_{y''''_A} \\ n_{z''''_A} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} n_{xp,C} \\ n_{yp,C} \\ n_{zp,C} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta_A & -\sin \beta_A & 0 \\ \sin \beta_A & \cos \beta_A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} n_{x''''_c} \\ n_{y''''_c} \\ n_{z''''_c} \end{pmatrix}$$

C 点の翼角を求めるために、矢視 J-J に示すように y_p-z_p 平面が C 点を含むように y_p 軸まわりに座標軸 $x_p-y_p-z_p$ を $-\varphi$ 回転させた座標系を $x'_p-y'_p-z'_p$ とすると角度 φ は

$$\varphi = \tan^{-1} \left(-\frac{x_{p,C}}{z_{p,C}} \right)$$

$$\begin{pmatrix} x'_{p,C} \\ y'_{p,C} \\ z'_{p,C} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_{p,C} \\ y_{p,C} \\ z_{p,C} \end{pmatrix}$$

C 点における法線ベクトルを $x'_p-y'_p-z'_p$ 座標系で表すと

$$\begin{pmatrix} n_{x'p,C} \\ n_{y'p,C} \\ n_{z'p,C} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{pmatrix} n_{xp,C} \\ n_{yp,C} \\ n_{zp,C} \end{pmatrix}$$

C 点の翼角 β_C は

$$\beta_C = \tan^{-1} \left(-\frac{n_{x'p,C}}{n_{y'p,C}} \right)$$

4.2.2 円錐台の半径が大きい側をプロペラ軸側とする場合

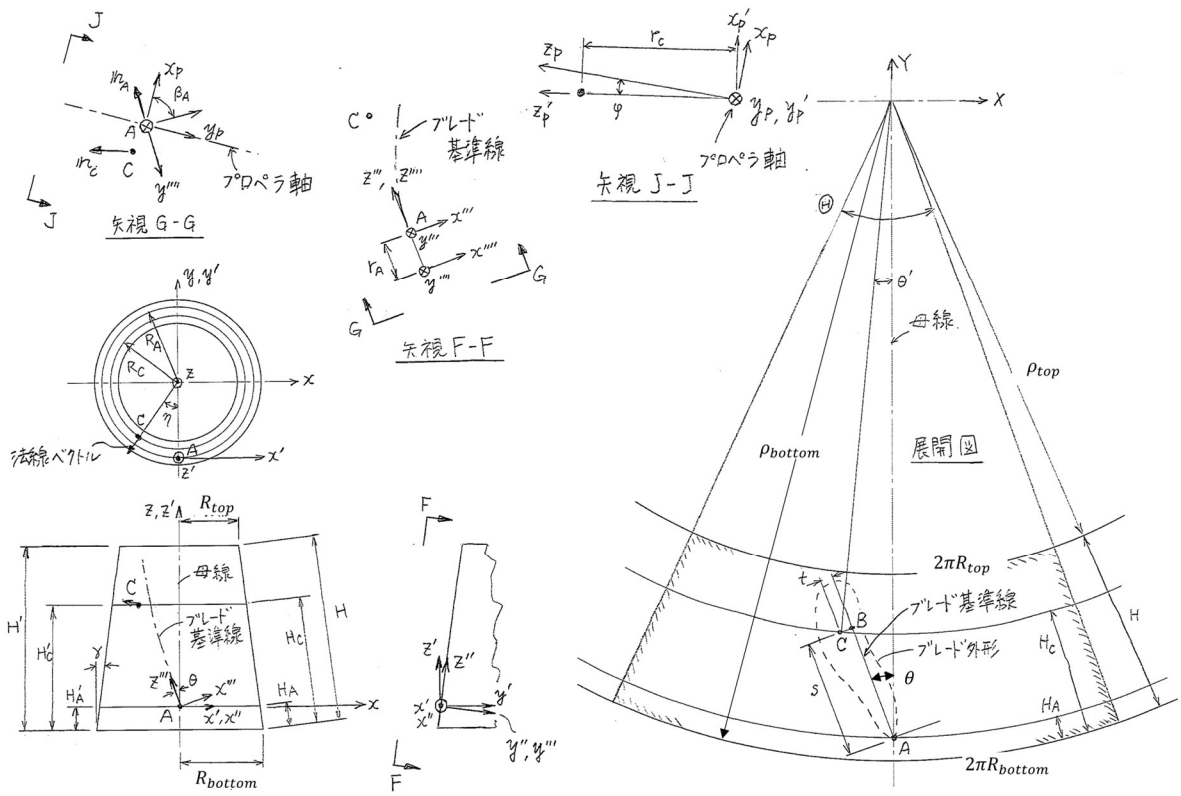


図 4-3 展開図と座標系の定義 - 円錐台の半径が大きい側をプロペラ軸側とする場合

4.2.2.1 展開図から円錐への座標変換

図 4-3 の寸法の計算式を導くと

$$\gamma = \sin^{-1} \frac{R_{bottom} - R_{top}}{H}$$

ここで、 R_{bottom} は円錐台の開いている方の半径、 R_{top} は円錐台のすぼまっている方の半径。 γ は正。

$$H' = H \cos \gamma$$

$$H'_A = H_A \cos \gamma$$

$$\frac{R_{top}}{R_{bottom}} = \frac{\rho_{top}}{\rho_{bottom}} = \frac{\rho_{top}}{\rho_{top} + H} \rightarrow \rho_{top} = \frac{H}{\frac{R_{bottom}}{R_{top}} - 1}$$

$$\theta = \frac{2\pi R_{bottom}}{\rho_{bottom}} = \frac{2\pi R_{top}}{\rho_{top}}$$

$$R_A = \frac{\rho_A \theta}{2\pi} = \frac{(\rho_{bottom} - H_A) \theta}{2\pi}$$

A 点の X-Y 座標成分は

$$\begin{pmatrix} X_A \\ Y_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\rho_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\rho_{bottom} + H_A \end{pmatrix}$$

B 点の X-Y 座標成分は

$$\begin{pmatrix} X_B \\ Y_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_A - s \sin \theta \\ Y_A + s \cos \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -s \sin \theta \\ s \cos \theta - \rho_{bottom} + H_A \end{pmatrix}$$

C 点の X-Y 座標成分は

$$\begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_B - t \cos \theta \\ Y_B - t \sin \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -s \sin \theta - t \cos \theta \\ s \cos \theta - \rho_{bottom} + H_A - t \sin \theta \end{pmatrix}$$

H_C , H'_C , R_C は

$$H_C = \rho_{bottom} - \rho_C = \rho_{bottom} - \sqrt{X_C^2 + Y_C^2}$$

$$H'_C = H_C \cos \gamma$$

$$R_C = \frac{\rho_C \theta}{2\pi} = \frac{(\rho_{bottom} - H_C) \theta}{2\pi}$$

A 点と C 点を x-y-z 座標系で表すと

$$\begin{pmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -R_A \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R_C \sin \eta \\ -R_C \cos \eta \\ H'_C - H'_A \end{pmatrix}$$

ここで,

$$\eta = \frac{\rho_C \theta'}{R_C} = \frac{(\rho_{bottom} - H_C) \theta'}{R_C}, \theta' = \tan^{-1} \left(\frac{X_C}{Y_C} \right)$$

A 点と C 点における法線ベクトルを x-y-z 座標系で表すと (z 方向成分が正であることを注意)

$$\begin{pmatrix} n_{x,A} \\ n_{y,A} \\ n_{z,A} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\cos \gamma \\ \sin \gamma \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} n_{x,C} \\ n_{y,C} \\ n_{z,C} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \eta & \sin \eta & 0 \\ -\sin \eta & \cos \eta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ -\cos \gamma \\ \sin \gamma \end{pmatrix}$$

4.2.2.2 ブレードの座標変換

A 点と C 点を, x-y-z 座標系の原点を A 点に平行移動した x'-y'-z' 座標系で表すと

$$\begin{pmatrix} x'_A \\ y'_A \\ z'_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x'_C \\ y'_C \\ z'_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R_C \sin \eta \\ -R_C \cos \eta + R_A \\ H'_C - H'_A \end{pmatrix}$$

x' - y' - z' 座標系を x' 軸まわりに $-\gamma$ 回転させた x'' - y'' - z'' 座標系で表すと

$$\begin{pmatrix} x''_A \\ y''_A \\ z''_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x''_C \\ y''_C \\ z''_C \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x'_C \\ y'_C \\ z'_C \end{pmatrix}$$

A 点と C 点における法線ベクトルを x'' - y'' - z'' 座標系で表すと

$$\begin{pmatrix} n_{x'',A} \\ n_{y'',A} \\ n_{z'',A} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{pmatrix} n_{x,A} \\ n_{y,A} \\ n_{z,A} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} n_{x'',C} \\ n_{y'',C} \\ n_{z'',C} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{pmatrix} n_{x,C} \\ n_{y,C} \\ n_{z,C} \end{pmatrix}$$

x'' - y'' - z'' 座標系を y'' 軸まわりに $-\theta$ 回転させた座標系で表すと

$$\begin{pmatrix} x'''_A \\ y'''_A \\ z'''_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x'''_C \\ y'''_C \\ z'''_C \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x''_C \\ y''_C \\ z''_C \end{pmatrix}$$

A 点と C 点における法線ベクトルを x''' - y''' - z''' 座標系で表すと

$$\begin{pmatrix} n_{x''',A} \\ n_{y''',A} \\ n_{z''',A} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} n_{x'',A} \\ n_{y'',A} \\ n_{z'',A} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} n_{x''',C} \\ n_{y''',C} \\ n_{z''',C} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} n_{x'',C} \\ n_{y'',C} \\ n_{z'',C} \end{pmatrix}$$

プロペラ軸が図 4-2 の矢視 F-F に示すように、A 点から z''' 軸のマイナスの方向に r_A 離れているとすると、この新しい x'''' - y'''' - z'''' 座標系で A 点、C 点の座標を表すと

$$\begin{pmatrix} x''''_A \\ y''''_A \\ z''''_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ r_A \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x''''_c \\ y''''_c \\ z''''_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x'''_c \\ y'''_c \\ z'''_c + r_A \end{pmatrix}$$

矢視 G-G に示すように、A 点における翼角が β_A となるようにプロペラ軸 y_p をとると (z''' 軸まわりに $-\beta_A$ 回転)、プロペラ軸座標系 $x_p-y_p-z_p$ の座標成分は

$$\begin{pmatrix} x_{p,A} \\ y_{p,A} \\ z_{p,A} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta_A & -\sin \beta_A & 0 \\ \sin \beta_A & \cos \beta_A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x''''_A \\ y''''_A \\ z''''_A \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x_{p,C} \\ y_{p,C} \\ z_{p,C} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta_A & -\sin \beta_A & 0 \\ \sin \beta_A & \cos \beta_A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x''''_c \\ y''''_c \\ z''''_c \end{pmatrix}$$

A 点と C 点における法線ベクトルを $x_p-y_p-z_p$ 座標系で表すと

$$\begin{pmatrix} n_{xp,A} \\ n_{yp,A} \\ n_{zp,A} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta_A & -\sin \beta_A & 0 \\ \sin \beta_A & \cos \beta_A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} n_{x''''_A} \\ n_{y''''_A} \\ n_{z''''_A} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} n_{xp,C} \\ n_{yp,C} \\ n_{zp,C} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta_A & -\sin \beta_A & 0 \\ \sin \beta_A & \cos \beta_A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} n_{x''''_c} \\ n_{y''''_c} \\ n_{z''''_c} \end{pmatrix}$$

C 点の翼角を求めるために、矢視 J-J に示すように y_p-z_p 平面が C 点を含むように y_p 軸まわりに座標軸 $x_p-y_p-z_p$ を $-\varphi$ 回転させた座標系を $x'_p-y'_p-z'_p$ とすると角度 φ は

$$\varphi = \tan^{-1} \left(-\frac{x_{p,C}}{z_{p,C}} \right)$$

$$\begin{pmatrix} x'_{p,C} \\ y'_{p,C} \\ z'_{p,C} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_{p,C} \\ y_{p,C} \\ z_{p,C} \end{pmatrix}$$

C 点における法線ベクトルを $x'_p-y'_p-z'_p$ 座標系で表すと

$$\begin{pmatrix} n_{x'p,C} \\ n_{y'p,C} \\ n_{z'p,C} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{pmatrix} n_{xp,C} \\ n_{yp,C} \\ n_{zp,C} \end{pmatrix}$$

C 点の翼角 β_C は

$$\beta_C = \tan^{-1} \left(-\frac{n_{x'p,C}}{n_{y'p,C}} \right)$$

5. キャンバーの大きさの計算式

5.1 円錐台の半径が小さい側をプロペラ軸側とする場合

キャンバーの大きさを計算するには、点 C を通る円錐の断面形状である楕円 $C-D-C'-D'$ (図 5-1) の長径と短径を求める必要がある。

点 C' 、点 E' を通る直線の式は、

$$w = -v \cot \gamma$$

点 C の座標は

$$v_C = \rho_C \sin \gamma$$

$$w_C = \rho_C \cos \gamma$$

点 C と点 C' を通る直線の式は、

$$w = -(v - v_C) \tan \gamma + w_C = -(v - v_C) \tan \gamma + \rho_C \cos \gamma$$

点 C' は、点 C' と点 E' を通る直線と、点 C と点 C' を通る直線の交点だから、

$$-v_{C'} \cot \gamma = -(v_{C'} - v_C) \tan \gamma + \rho_C \cos \gamma$$

この式を整理すると、

$$v_{C'} \tan \gamma - v_{C'} \cot \gamma = v_C \tan \gamma + \rho_C \cos \gamma$$

$$-v_{C'} = \frac{v_C \tan \gamma + \rho_C \cos \gamma}{\cot \gamma - \tan \gamma}$$

図 5-1 から

$$\begin{aligned} 2b \cos \gamma = v_C - v_{C'} &= v_C + \frac{v_C \tan \gamma + \rho_C \cos \gamma}{\cot \gamma - \tan \gamma} = \frac{v_C \cot \gamma - v_C \tan \gamma + v_C \tan \gamma + \rho_C \cos \gamma}{\cot \gamma - \tan \gamma} \\ &= \frac{v_C \cot \gamma + \rho_C \cos \gamma}{\cot \gamma - \tan \gamma} = \frac{\rho_C \sin \gamma \cot \gamma + \rho_C \cos \gamma}{\cot \gamma - \tan \gamma} = \frac{2\rho_C \cos \gamma}{\cot \gamma - \tan \gamma} \end{aligned}$$

したがって、

$$b = \frac{1}{\cot \gamma - \tan \gamma} \rho_C$$

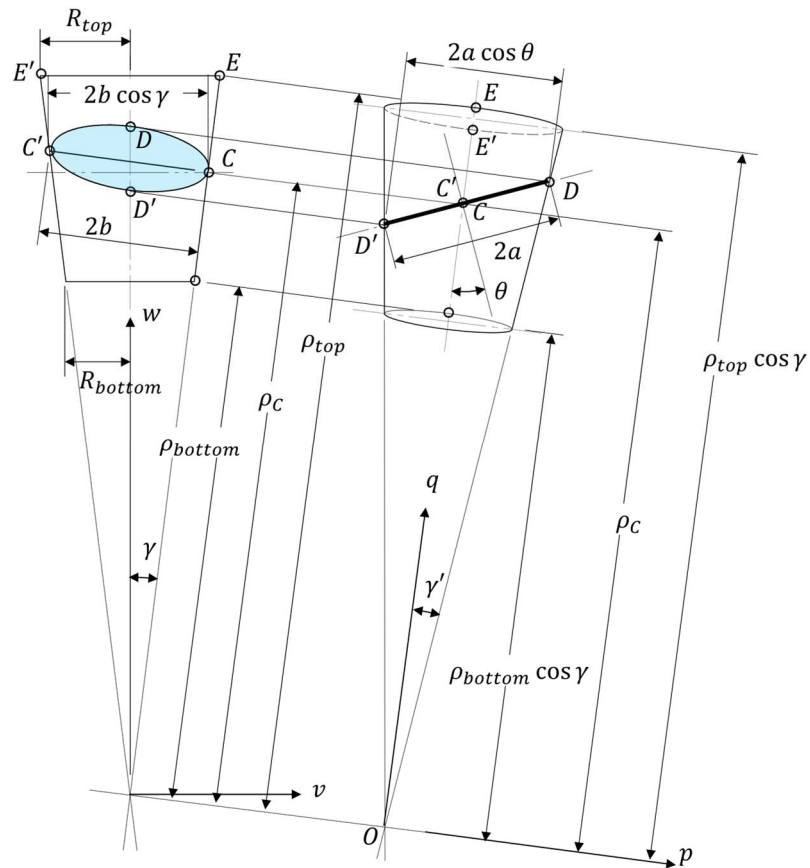


図 5-1 キャンバーの計算 - 円錐台の半径が小さい側をプロペラ軸側とする場合

図 5-1 の右側の図から、

$$\sin \gamma' = \frac{R_{bottom}}{\rho_{bottom} \cos \gamma}$$

点 O と点 D を通る直線は

$$q = p \cot \gamma'$$

点 O と点 D' を通る直線は

$$q = -p \cot \gamma'$$

点 D' 、点 C 、点 D' を通る直線は

$$q = p \tan \theta + \rho_c$$

点 D は、点 O と点 D を通る直線と点 D' 、点 C 、点 D' を通る直線の交点だから

$$p_D \cot \gamma' = p_D \tan \theta + \rho_c$$

この式を整理すると、

$$p_D = \frac{\rho_c}{\cot \gamma' - \tan \theta}$$

点 D' は、点 O と点 D' を通る直線と点 D' 、点 C 、点 D' を通る直線の交点だから

$$-p_{D'} \cot \gamma' = p_{D'} \tan \theta + \rho_c$$

この式を整理すると,

$$-p_{D'} = \frac{\rho_C}{\cot \gamma' + \tan \theta}$$

したがって,

$$\begin{aligned} 2a \cos \theta = p_D - p_{D'} &= \frac{\rho_C}{\cot \gamma' - \tan \theta} + \frac{\rho_C}{\cot \gamma' + \tan \theta} = \left(\frac{1}{\cot \gamma' - \tan \theta} + \frac{1}{\cot \gamma' + \tan \theta} \right) \rho_C \\ &= \frac{\cot \gamma' + \sin \theta + \cot \gamma' - \sin \theta}{(\cot \gamma' - \tan \theta)(\cot \gamma' + \tan \theta)} \rho_C = \frac{2 \cot \gamma'}{(\cot \gamma' - \tan \theta)(\cot \gamma' + \tan \theta)} \rho_C \end{aligned}$$

⇒

$$a = \frac{1}{\cos \theta} \frac{\cot \gamma'}{(\cot \gamma' - \tan \theta)(\cot \gamma' + \tan \theta)} \rho_C$$

5.2 円錐台の半径が大きい側をプロペラ軸側とする場合

図 5-2 を参照して前項と同様に計算する.

点 C' , 点 E' を通る直線の式は,

$$w = v \cot \gamma$$

点 C の座標は

$$v_C = \rho_C \sin \gamma$$

$$w_C = -\rho_C \cos \gamma$$

点 C と点 C' を通る直線の式は,

$$w = (v - v_C) \tan \gamma + w_C = (v - v_C) \tan \gamma - \rho_C \cos \gamma$$

点 C' は, 点 C' と点 E' を通る直線と, 点 C と点 C' を通る直線の交点だから,

$$v_{C'} \cot \gamma = (v_{C'} - v_C) \tan \gamma - \rho_C \cos \gamma$$

この式を整理すると,

$$-v_{C'} \tan \gamma + v_{C'} \cot \gamma = -v_C \tan \gamma - \rho_C \cos \gamma$$

$$-v_{C'} = \frac{v_C \tan \gamma + \rho_C \cos \gamma}{\cot \gamma - \tan \gamma}$$

図 5-1 から

$$\begin{aligned} 2b \cos \gamma = v_C - v_{C'} &= v_C + \frac{v_C \tan \gamma + \rho_C \cos \gamma}{\cot \gamma - \tan \gamma} = \frac{v_C \cot \gamma - v_C \tan \gamma + v_C \tan \gamma + \rho_C \cos \gamma}{\cot \gamma - \tan \gamma} \\ &= \frac{v_C \cot \gamma + \rho_C \cos \gamma}{\cot \gamma - \tan \gamma} = \frac{\rho_C \sin \gamma \cot \gamma + \rho_C \cos \gamma}{\cot \gamma - \tan \gamma} = \frac{2\rho_C \cos \gamma}{\cot \gamma - \tan \gamma} \end{aligned}$$

したがって,

$$b = \frac{\rho_C}{\cot \gamma - \tan \gamma}$$

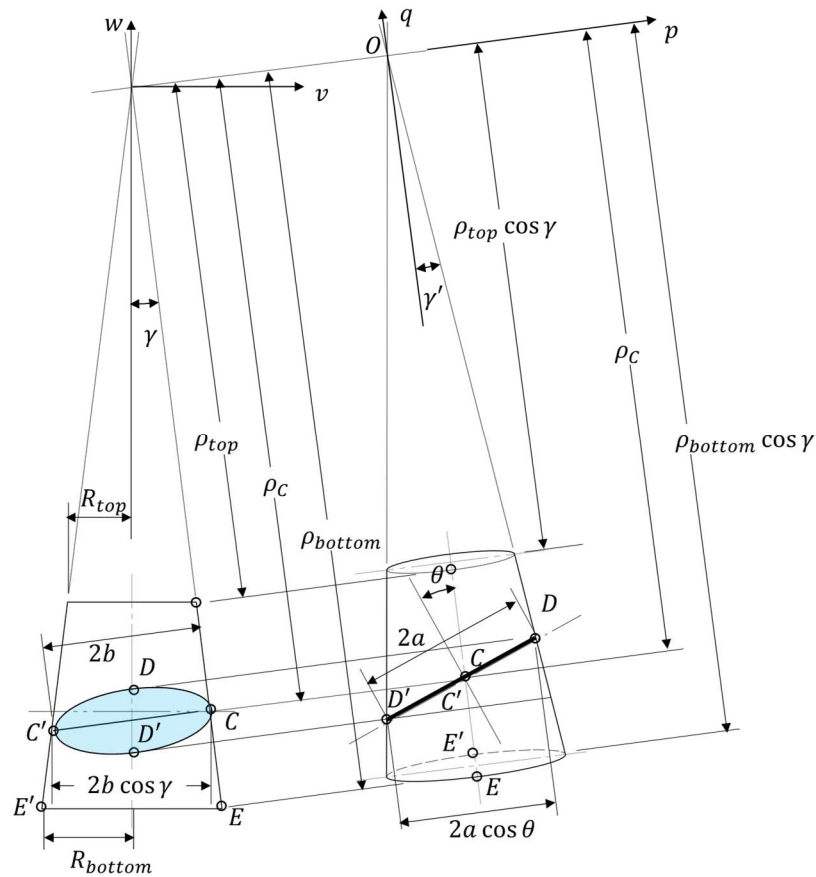


図 5-2 キャンバーの計算 - 円錐台の半径が大きい側をプロペラ軸側とする場合

図 5-2 の右側の図から,

$$\sin \gamma' = \frac{R_{bottom}}{\rho_{bottom} \cos \gamma}$$

点 O と点 D を通る直線は

$$q = -p \cot \gamma'$$

点 O と点 D' を通る直線は

$$q = p \cot \gamma'$$

点 D' , 点 C , 点 D' を通る直線は

$$q = p \tan \theta - \rho_c$$

点 D は, 点 O と点 D を通る直線と点 D' , 点 C , 点 D' を通る直線の交点だから

$$-p_D \cot \gamma' = p_D \tan \theta - \rho_c$$

この式を整理すると,

$$p_D = \frac{\rho_c}{\cot \gamma' + \tan \theta}$$

点 D' は, 点 O と点 D' を通る直線と点 D' , 点 C , 点 D' を通る直線の交点だから

$$p_{D'} \cot \gamma' = p_{D'} \tan \theta - \rho_c$$

この式を整理すると,

$$-p_{D'} = \frac{\rho_c}{-\cot \gamma' + \tan \theta}$$

したがって,

$$\begin{aligned} 2a \cos \theta = p_D - p_{D'} &= \frac{\rho_c}{\cot \gamma' + \tan \theta} + \frac{\rho_c}{\cot \gamma' - \tan \theta} = \left(\frac{1}{\cot \gamma' + \tan \theta} + \frac{1}{\cot \gamma' - \tan \theta} \right) \rho_c \\ &= \frac{\cot \gamma' + \tan \theta + \cot \gamma' - \tan \theta}{(\cot \gamma' - \tan \theta)(\cot \gamma' + \tan \theta)} \rho_c = \frac{2 \cot \gamma'}{(\cot \gamma' - \tan \theta)(\cot \gamma' + \tan \theta)} \rho_c \end{aligned}$$

⇒

$$a = \frac{1}{\cos \theta} \frac{\cot \gamma'}{(\cot \gamma' - \tan \theta)(\cot \gamma' + \tan \theta)} \rho_c$$

5.3 キャンバーの大きさ

C点を含むブレード断面の翼弦長が c のときのキャンバーの大きさを図 5-3 を使って求める。

楕円の式は次のように表される。

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 = 1$$

変形すると,

$$y = b \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2}$$

点 Q の y 座標は,

$$y_Q = b \sqrt{1 - \left(\frac{c}{a}\right)^2}$$

したがって,

$$f = b - y_Q = b - b \sqrt{1 - \left(\frac{c}{a}\right)^2} = b \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{c}{a}\right)^2} \right]$$

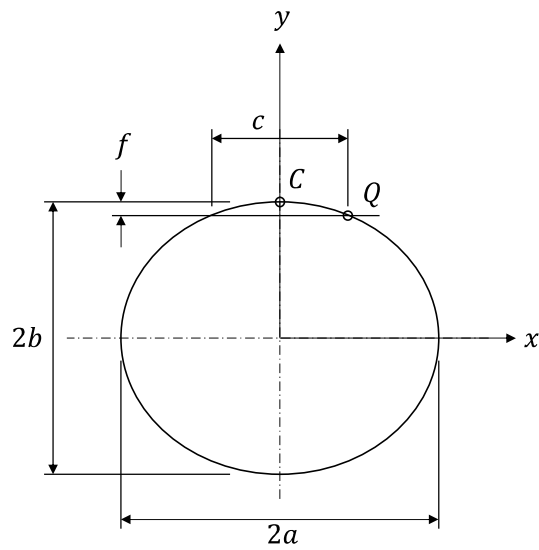


図 5-3 キャンバーの大きさ

6. 解析ツールとその検証

6.1 MS-Excel のワークシート

第 4 項, 第 5 項の式を使って, MS-Excel の解析ツールを作成した (エラー! 参照元が見つかりません。 エラー! 参照元が見つかりません。).

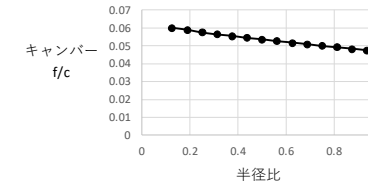
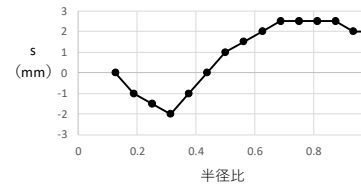
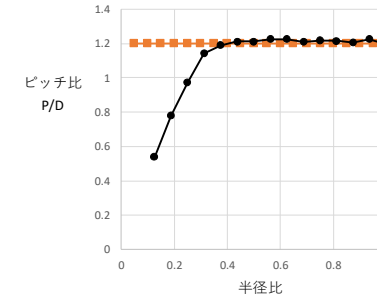
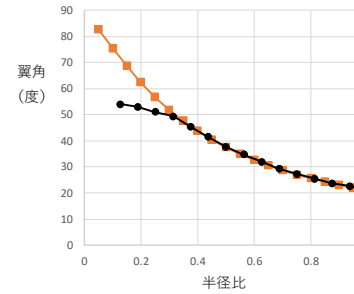
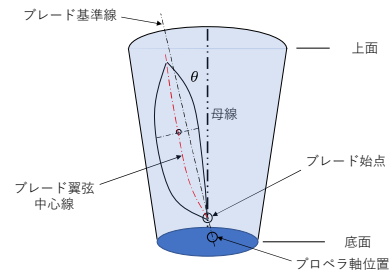
表 6-1 円錐面を使ったプロペラブレードの解析ツール (1)

円錐巻き付けプロペラの設計ツール -- 半径が小さい面がプロペラ軸側

2022/7/20 滝

入力データ

プロペラ直径	D	(mm)	160
ピッチ比	P/D		1.2
円錐半径 (上面)	R_top	(mm)	39.5
円錐半径 (底面)	R_bottom	(mm)	29
母線長さ	H	(mm)	84
ブレード始点	r_A	(mm)	10
	H_A	(mm)	10
	r_tip	(mm)	80
	beta_A	(deg)	54
		(rad)	0.9424778
	theta	(deg)	18
		(rad)	0.31415927
	gamma	(rad)	0.12532783
		(deg)	7.18075578
	H'	(mm)	83.3411663
	H'_A	(mm)	9.92156742
	rho_bottom	(mm)	232
	rho_top	(mm)	316
	THETA	(rad)	0.78539816
		(deg)	45
	R_A	(mm)	30.25
	gamma'	(rad)	0.12632386
		(deg)	7.23782421



ピッチ比 P/D	翼角 (deg)	半径比	半径 (mm)	s (mm)	t (mm)	c (mm)	X_C (mm)	Y_C (mm)	b (mm)	f (mm)	f/c	
0.541	54.00	0.125	10	0	0	0	16	0	2	30.98089	0.961005	0.060063
0.780	52.93	0.187641535	15.0113228	5	-1	16	-0.59403	247.064	1.62932	0.940693	0.058793	
0.974	51.09	0.250221087	20.0176869	10	-1.5	16	-1.66359	251.974	32.25848	0.921801	0.057613	
1.143	49.32	0.312781241	25.0224992	15	-2	16	-2.73314	256.81	32.88819	0.903647	0.056478	
1.190	45.29	0.374931126	29.9944901	20	-1	16	-5.22928	261	33.46224	0.887719	0.055482	
1.211	41.41	0.437324462	34.985957	25	0	16	-7.72542	265	34.03913	0.872275	0.054517	
1.212	37.65	0.499897194	39.9917755	30	1	16	-10.2216	270.2	34.61871	0.857297	0.053581	
1.226	34.76	0.562404792	44.9923833	35	1.5	16	-12.2422	274.82	5.21785	0.842352	0.052647	
1.225	31.97	0.624898612	49.9918889	40	2	16	-14.2628	279.424	8.1852	0.827888	0.051743	
1.211	29.27	0.687365159	54.9892128	45	2.5	16	-16.2834	284.07	6.42065	0.813886	0.050868	
1.218	27.36	0.749558989	59.9647192	50	2.5	16	-17.8285	288.71	37.0401	0.799971	0.049998	
1.216	25.50	0.811702028	64.9361623	55	2.5	16	-19.3736	293	37.66025	0.786515	0.049157	
1.205	23.70	0.873792551	69.9034041	60	2.5	16	-20.9187	298.1	38.28105	0.773495	0.048343	
1.225	22.62	0.935669513	74.853561	65	2	16	-21.9882	303.20	39.91775	0.760586	0.047537	
1.198	20.92	0.997666308	79.8133047	70	2	16	-23.5333	307.955	39.953	0.748392	0.046775	

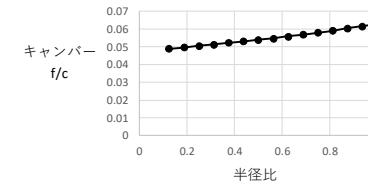
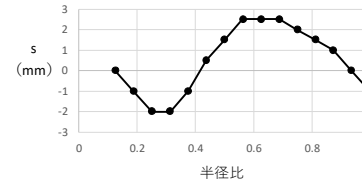
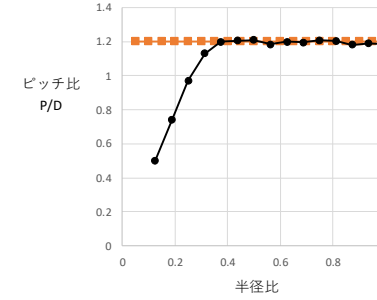
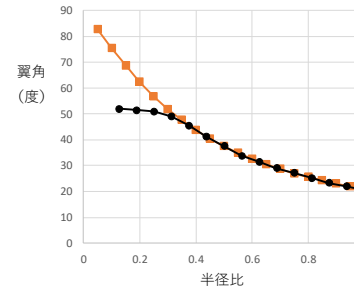
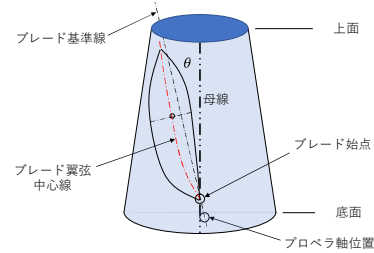
表 6-2 円錐面を使ったプロペラブレードの解析ツール (2)

円錐巻き付けプロペラの設計ツール -- 半径が大きい面がプロペラ軸側

2022/7/20 滝

入力データ

プロペラ直径	D	(mm)	160
ピッチ比	P/D		1.2
円錐半径 (上面)	R_top	(mm)	29
円錐半径 (底面)	R_bottom	(mm)	39.5
母線長さ	H	(mm)	84
ブレード始点	r_A	(mm)	10
	H_A	(mm)	10
	r_tip	(mm)	80
beta_A	(deg)		52
	(rad)		0.90757121
theta	(deg)		15
	(rad)		0.26179939
gamma	(rad)		0.12532783
	(deg)		7.18075578
H'	(mm)		83.3411663
H'_A	(mm)		9.92156742
rho_bottom	(mm)		316
rho_top	(mm)		232
THETA	(rad)		0.78539816
	(deg)		45
R_A	(mm)		38.25
gamma'	(rad)		0.12632386
	(deg)		7.23782421



ピッチ比 P/D	翼角 (deg)	半径比	半径 (mm)	s (mm)	t (mm)	c (mm)	X_C (mm)	Y_C (mm)	f (mm)	f/c			
	0.503	52.00	0.125	10	0	0	16	0	-306	17419	0.780419	0.048776	
	0.741	51.49	0.187657281	15.0125825	5	-1	16	-0.32817	-300.912	15	2279	0.79389	0.049618
	0.970	50.96	0.250469765	20.0375812	10	-2	16	-0.65634	-295.823	20	143	0.80784	0.05049
	1.131	49.00	0.312851426	25.028114	15	-2	16	-1.95043	-290.993	2	89	0.82153	0.051346
	1.200	45.53	0.375006858	30.0005486	20	-1	16	-4.21046	-286.423		186	0.83487	0.052179
	1.205	41.24	0.437472314	34.9977851	25	0.5	16	-6.95344	-281.98'		11028	0.848164	0.05301
	1.209	37.58	0.500158426	40.0126741	30	1.5	16	-9.21346	-277		35.53373	0.862265	0.053892
	1.185	33.82	0.562963135	45.0370508	35	2.5	16	-11.4735	-27		+ 34.95986	0.87678	0.054799
	1.201	31.43	0.625292644	50.0234116	40	2.5	16	-12.7676	-268.		* 34.34961	0.892769	0.055798
	1.195	28.96	0.687561784	55.0049427	45	2.5	16	-14.0617	-263.1b		33.74047	0.909329	0.056833
	1.207	27.15	0.749576602	59.9661282	50	2	16	-14.8728	-258.221	b	11234	0.92707	0.057942
	1.203	25.26	0.811568849	64.9255079	55	1.5	16	-15.6839	-253.262	62..	1481	0.945511	0.059094
	1.182	23.30	0.873522314	69.8817851	60	1	16	-16.4951	-248.303	67.14b	9	0.964692	0.060293
	1.190	22.05	0.935419202	74.8335362	65	0	16	-16.8232	-243.215	72.2'	1	0.985337	0.061584
	1.187	20.75	0.997363845	79.7891076	70	-1	16	-17.1514	-238.126	77	396	1.006893	0.062931

6.2 円筒の場合の検証

円筒を使ったブレードの場合は、参考資料[7]の解析ツールで計算できる。本報告の解析ツールで円錐の底面の半径と上面の半径をほとんど等しくすれば円筒の場合と同じ結果が得られなければならない。円錐の解析ツールで円筒の場合を計算した結果、円筒の解析ツールと同じ正しい値が得られることを確認した。

6.3 円錐の場合の検証

図 6-1 に示すプラスチックコップを使って等ピッチプロペラブレードを設計・製作し、翼角を実測して、解析ツールの妥当性の検証を行った。寸法は以下のとおり。

プロペラ直径 $D=160$ mm, ピッチ比 $P/D=1.2$, 翼弦長 $c=16$ mm

円錐の形状 半径 $R=29$ mm, 39.5 mm, 母線の長さ $H=84$ mm

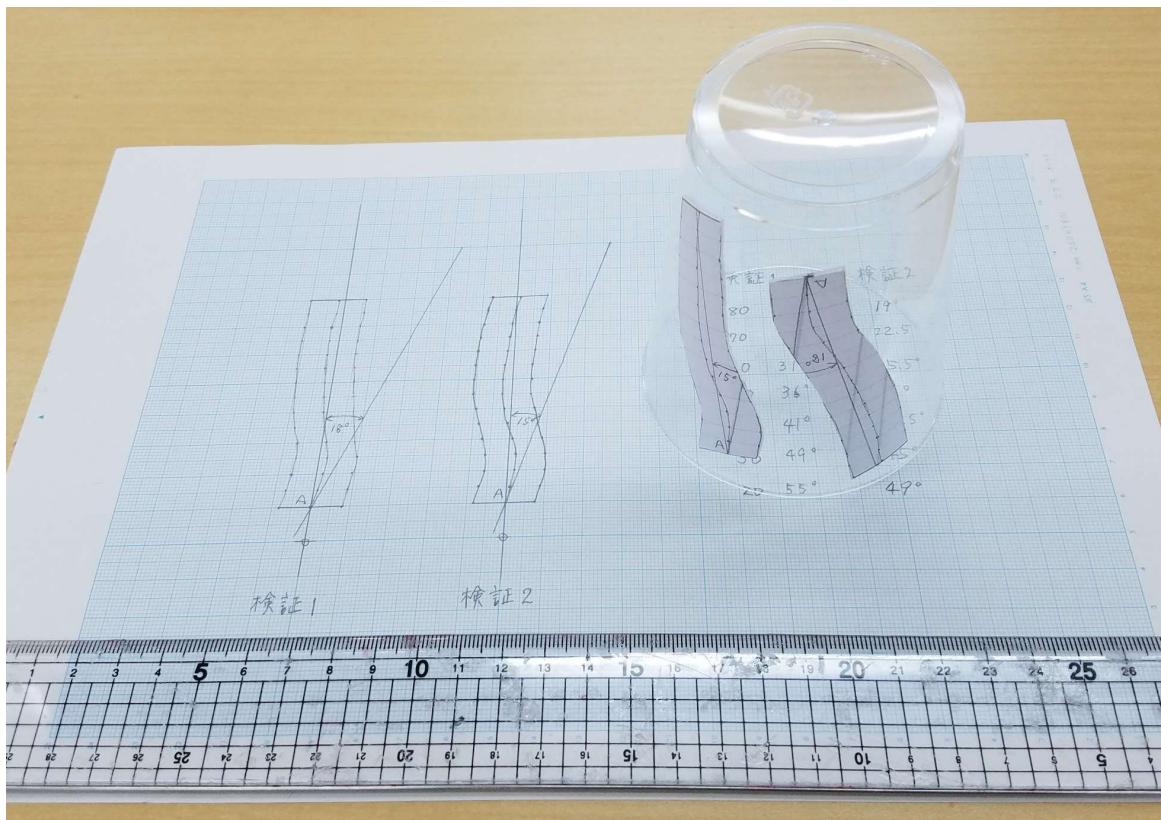


図 6-1 円錐の場合の検証

6.3.1 円錐の場合の検証 1

プロペラ軸を円錐の半径の小さい側にとった場合のブレードを設計・製作し、その翼角を実測した。結果を図 6-2 に示す。角度計測の誤差は 2 度程度あるので、設計値と実測値はほとんど一致していると言える。

6.3.2 円錐の場合の検証 2

プロペラ軸を円錐の半径の小さい側にとった場合のブレードを設計・製作し、その翼角を実測した。結果を図 6-3 に示す。設計値と実測値はほとんど一致している。

6.4 清水和夫氏の設計例の検証

清水和夫氏のプロペラ設計例を表 6-3 に示す(参考資料[9])。この設計例を表 6-1 の解析ツールで解析した。プロペラ直径、円筒直径、巻付角と表の一番右の列の数値が解析ツールの s の入力値になる。清水氏の翼角(表 6-3 の右から 2 番めの列)と解析結果を比較したのが図 6-4 である。若干の差があるのは、清水氏の計算式が近似式であるためと考えられる。

入力データ

プロペラ直径	D	(mm)	160
ピッチ比	P/D		1.2
円錐半径 (上面)	R_top	(mm)	39.5
円錐半径 (底面)	R_bottom	(mm)	29
母線長さ	H	(mm)	84
ブレード始点	r_A	(mm)	10
	H_A	(mm)	10
	r_tip	(mm)	80
	beta_A	(deg)	54
		(rad)	0.9424778
	theta	(deg)	18
		(rad)	0.31415927
	gamma	(rad)	0.12532783
		(deg)	7.18075578
	H'	(mm)	83.3411663
	H'_A	(mm)	9.92156742
	rho_bottom	(mm)	232
	rho_top	(mm)	316
	THETA	(rad)	0.78539816
		(deg)	45
	R_A	(mm)	30.25
	gamma'	(rad)	0.12632386
		(deg)	7.23782421

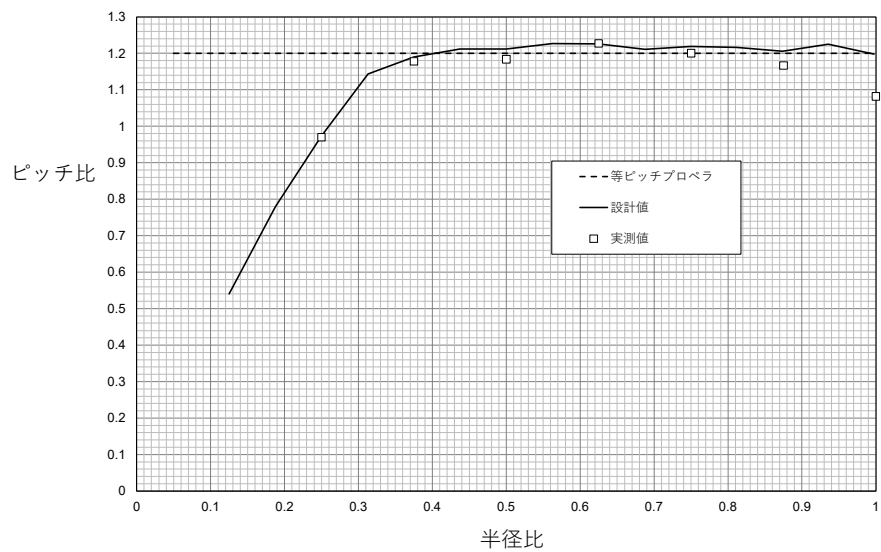
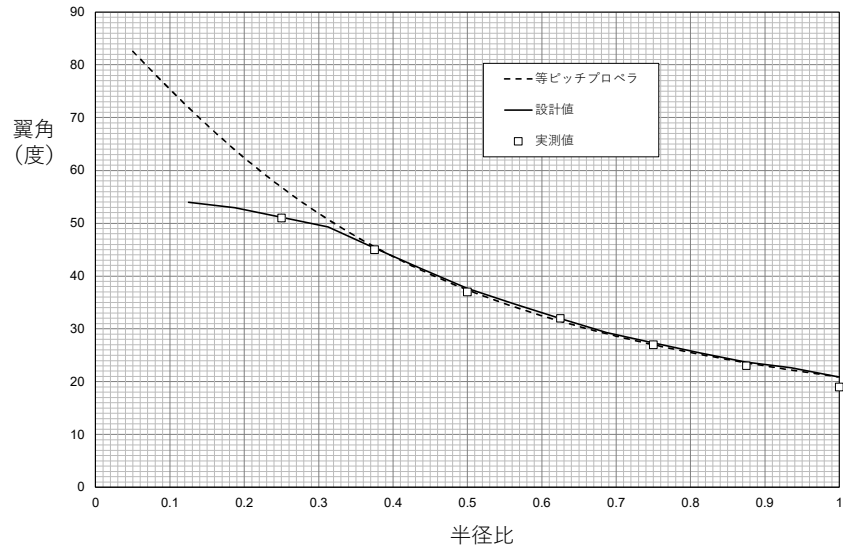
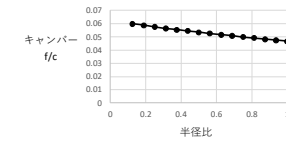
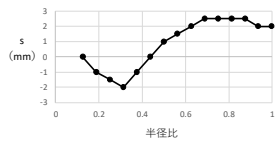
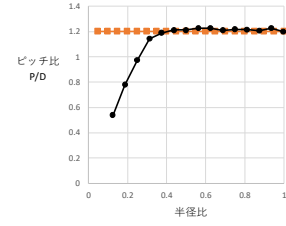
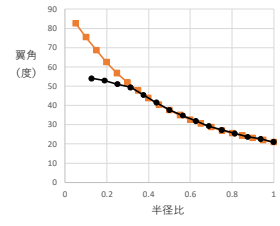
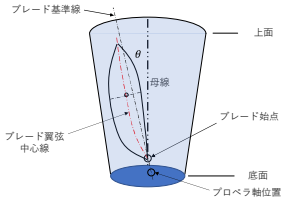


図 6-2 プロペラ軸を円錐の半径の小さい側にとった場合のブレードの設計と実測の比較

入力データ

プロペラ直径	D	(mm)	160
ピッチ比	P/D		1.2
円錐半径 (上面)	R_top	(mm)	29
円錐半径 (下面)	R_bottom	(mm)	39.5
母線長さ	H	(mm)	84
ブレード始点	r_A	(mm)	10
	H_A	(mm)	10
	r_tip	(mm)	80
	beta_A	(deg)	52
	theta	(deg)	15
	theta	(rad)	0.26179939
	gamma	(rad)	0.12532783
	gamma	(deg)	7.18075578
	H'	(mm)	83.3411663
	H'_A	(mm)	9.92156742
	rho_bottom	(mm)	316
	rho_top	(mm)	232
	THETA	(rad)	0.78539816
	theta	(deg)	45
	R_A	(mm)	38.25
	gamma'	(rad)	0.12632386
	gamma'	(deg)	7.23782421

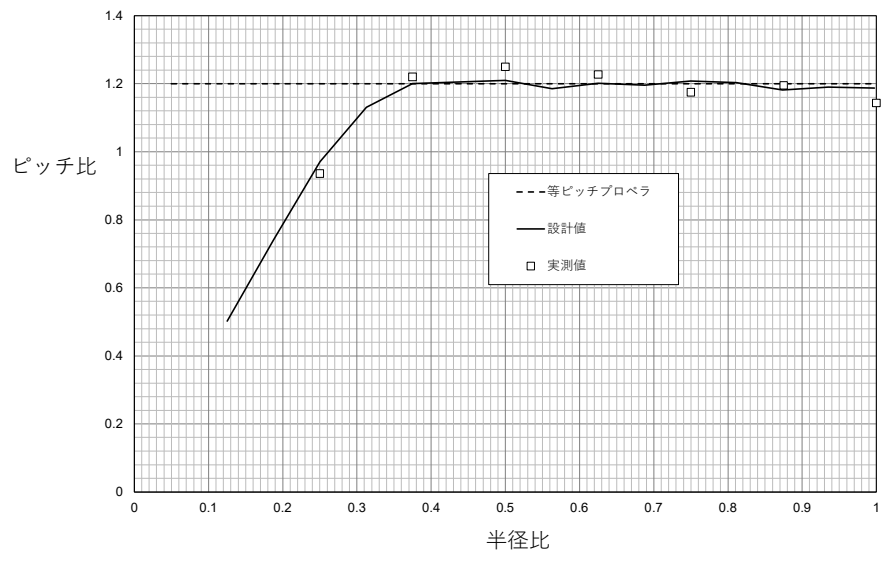
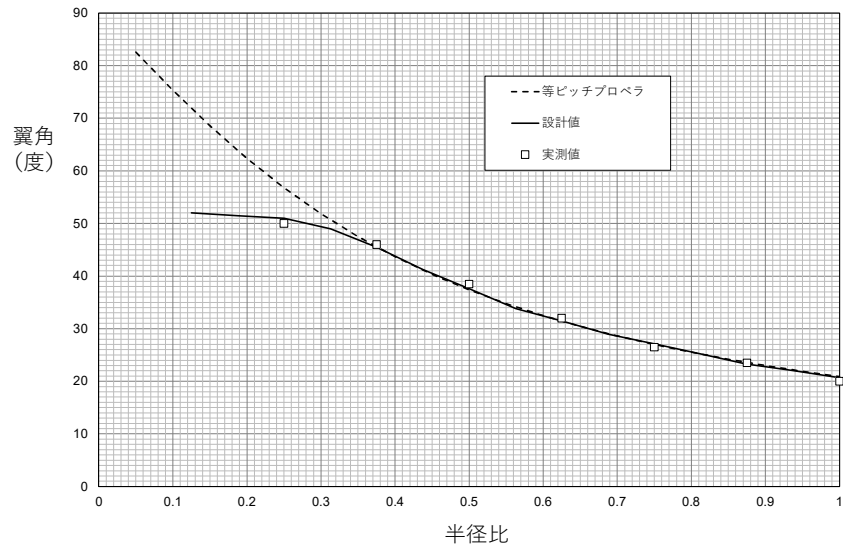
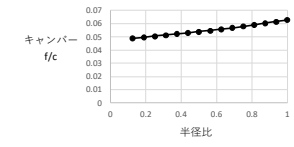
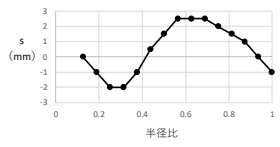
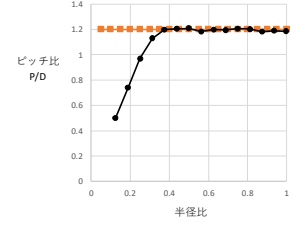
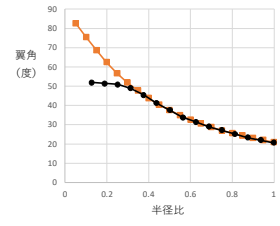
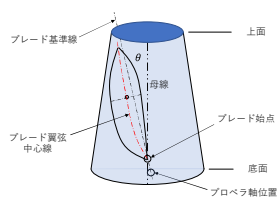


図 6-3 プロペラ軸を円錐の半径の大きい側にとった場合のブレードの設計と実測の比較

表 6-3 清水和夫氏のプロペラ設計例

翼素位置	条件 (基本設計)		計算値					
	ピッチ角	①	h	C	R	θ	②	③
	ピッチ分布 (P/d)	ブレード中	(%) アウター キャンバー	プレート中	円筒直径	巻付角	()はピッチ角 との差	前縁方向 への移動量
100% R ₁₂₀	17.94° (1.02)	28.8 ミリ			"	18.824°	17.94° (±0°)	0 ミリ
90% R ₁₀₈	20.51° (1.06)	30.4			"		21.34° (+0.83°)	0.95 ミリ
80% R ₉₆	23.55° (1.09)	32.8			"		24.74° (+1.19°)	1.36
設No.7. 70 R ₈₄	26.57° (1.1)	34.4	2.03 ミリ (5.9%)	32.3 ミリ	130.5		28.14° (+1.57°)	1.79
製No.17 60 R ₇₂	29.78° (1.08)	36.0			"		31.54° (+1.76°)	2.0
50 R ₆₀	33.62° (1.04)	36.8			"		34.94° (+1.32°)	1.5
40 R ₄₈	37.17° (0.95)	36.8			"		38.34° (+1.17°)	1.33
30% R ₃₆	41.74° (0.84)	31.2 ミリ			"		41.74° (±0°)	0 ミリ

入力データ

プロペラ直径	D	(mm)	240
ピッチ比	P/D		1.1
円錐半径 (上面)	R_top	(mm)	65.25
円錐半径 (底面)	R_bottom	(mm)	65.2
母線長さ	H	(mm)	130
ブレード始点	r_A	(mm)	12
	H_A	(mm)	10
	r_tip	(mm)	120
	beta_A	(deg)	48
	theta	(deg)	18.823
		(rad)	0.32852333
	gamma	(rad)	0.00038462
		(deg)	0.02203684
	H'	(mm)	129.99999
	H'_A	(mm)	9.9999926
	rho_bottom	(mm)	169520
	rho_top	(mm)	169650
	THETA	(rad)	0.00241661
		(deg)	0.13846154
	R_A	(mm)	65.2038462
	gamma'	(rad)	0.00038462
		(deg)	0.02203684

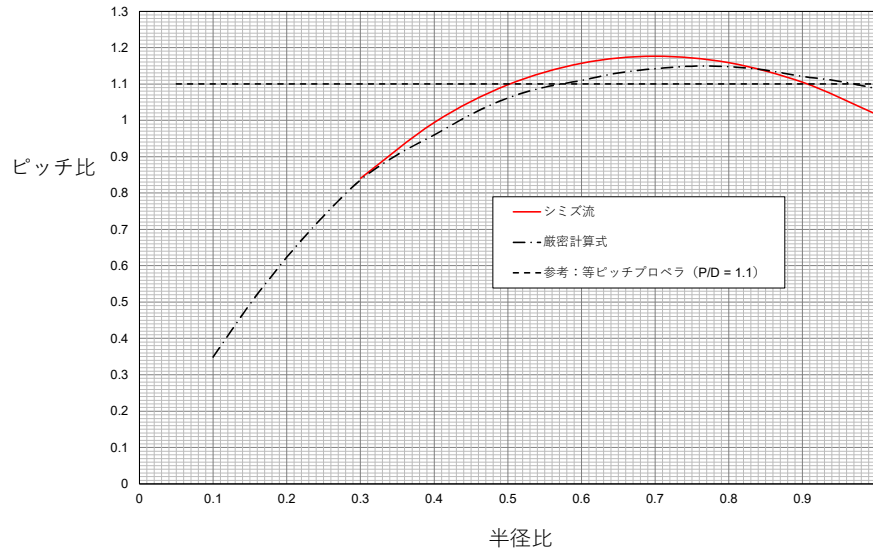
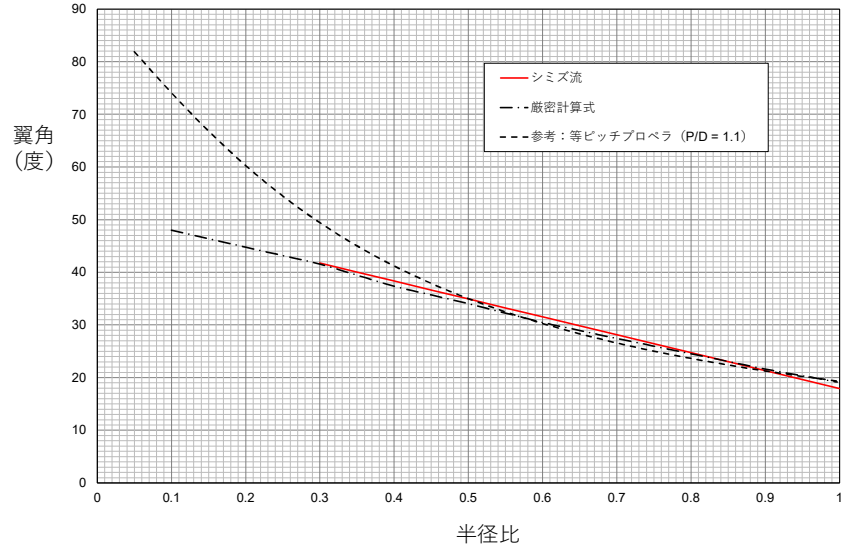
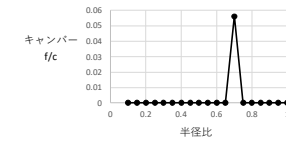
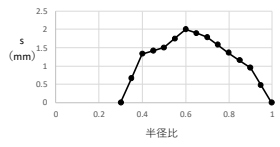
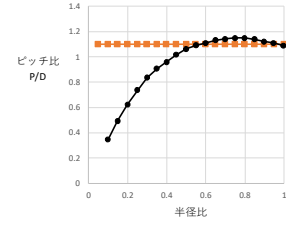
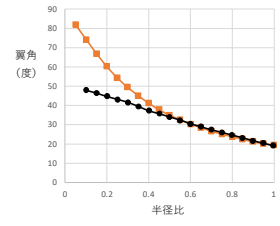
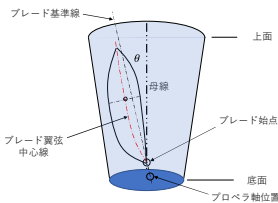


図 6-4 清水和夫氏の設計例の検証