

1.1 推力変化に対する機体応答特性

(飛行中にエンジン推力を減らしてもなぜ速度は減らないのか)

(なぜ自ら降下し速度を維持するのか)

H25(2013).9.7(D) 片柳亮二

航空機はエンジン推力により速度維持しています。機体に働く空気抵抗による力と推力が釣り合って飛行しているわけです。従って、もしエンジンが故障して推力がなくなった場合には、機体は速度を維持できずに落ちてしまうのではないかと考える人が多いと思います。これはまちがいで、実は航空機は推力が減っても速度を維持するようにできています。航空機は速度維持するために自ら降下するのです。以下このような航空機の実態について考えてみましょう。

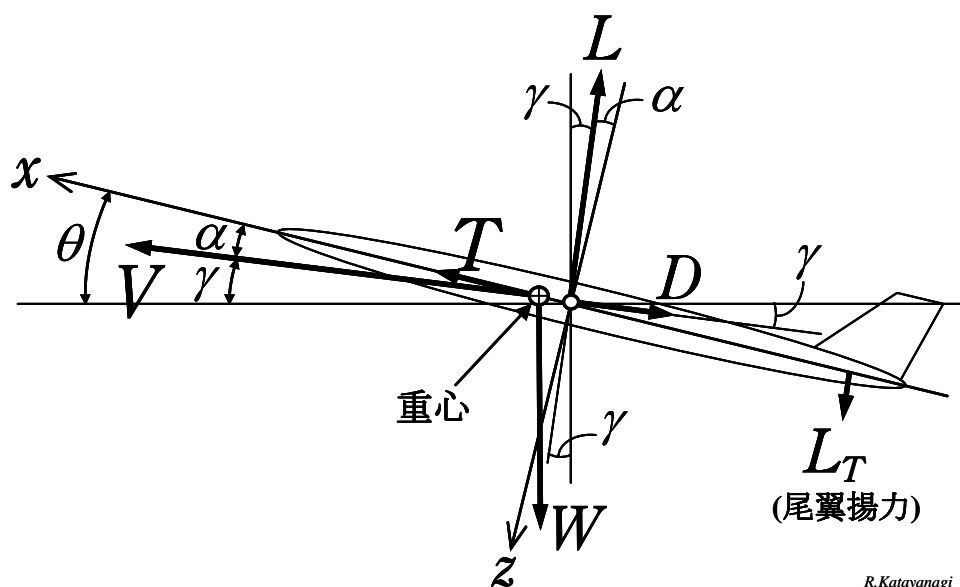


図1 航空機に働く力

まず図1に示す航空機に働く力の釣り合いについて考えてみよう。航空機に働く力は、主翼揚力 L 、尾翼揚力 L_T 、抗力（空気抵抗） D 、機体重量 W およびエンジン推力 T であり、機体速度 V 方向の運動方程式として次式が得られます。

$$\frac{W}{g} \cdot \frac{dV}{dt} = -D - W \sin \gamma + T \cos \alpha \quad (1)$$

ここで、 α は迎角 (deg)、 γ (deg) は飛行経路角、 g は重力の加速度です。

一方、機体速度の方向と直角方向の運動方程式は次のようになります。

$$\frac{WV}{57.3g} \cdot \frac{d\gamma}{dt} = (L - L_T) - W \cos \gamma + T \sin \alpha \quad (2)$$

なお、図1で θ はピッチ姿勢角（機体の前後方向軸 x が水平面から上を向

いている角度) であり, 次の関係があります.

$$\gamma = \theta - \alpha \quad (3)$$

実は航空機の運動を考える場合, (1)式および(2)式の力の釣り合いだけでは不足なのです. 力の釣り合いの他に重心まわりの回転の釣り合い(モーメント)を考慮する必要があります. 航空機が安定に飛行するために, パイロットが水平尾翼の後端にある昇降舵を動かして重心まわりの釣り合いをとっているわけです. 機体はトリム状態(機体を釣り合い位置に安定させること)であっても, 機体は常に外乱等によって運動周期の短い動きをしていますが, その運動はすぐに減衰してしまうので無視し, 速度変化のような比較的周期の長い運動に注目しましょう. このとき, 重心まわりの回転の釣り合い式は次のようになります.

$$\frac{I}{57.3} \cdot \frac{dq}{dt} = (-x_G \cdot L + x_T \cdot L_T) \cos \alpha \quad (4)$$

ここで, q は重心まわりのピッチ角速度, I は重心まわりの慣性モーメント, x_G は主翼揚力の作用点と重心との x 軸方向距離, x_T は尾翼揚力の作用点と重心との x 軸方向距離です.

さて, 推力を変化させた場合, 機体運動が生じますが, 次のようなトリム状態(添字0で表します)からの変化を考えます. ただし

$$\gamma_0 = 0 \text{ (水平飛行)}, \quad \alpha_0 \doteq \text{小さい} \quad (5)$$

と仮定します.

$$\begin{cases} T \rightarrow T_0 + \Delta T, & V \rightarrow V_0 + \Delta V \\ L \rightarrow L_0 + \Delta L, & L_T \rightarrow L_{T0}, & D \rightarrow D_0 + \Delta D \\ \gamma \rightarrow \Delta \gamma, & \sin \gamma \rightarrow \Delta \gamma / 57.3, & \cos \gamma \rightarrow 1 \\ \alpha \rightarrow \alpha_0 + \Delta \alpha, & \sin \alpha \rightarrow (\alpha_0 + \Delta \alpha) / 57.3, & \cos \alpha \rightarrow 1 \end{cases} \quad (6)$$

このとき, (1)式, (2)式および(4)式は次のように表されます.

$$\begin{cases} \frac{W}{g} \cdot \frac{d\Delta V}{dt} = -\Delta D - W \cdot \Delta \gamma / 57.3 + \Delta T \\ \frac{WV}{57.3g} \cdot \frac{d\Delta \gamma}{dt} = \Delta L + T_0 \cdot \Delta \alpha / 57.3 \\ \frac{I}{57.3} \cdot \frac{dq}{dt} = -x_G \cdot \Delta L \end{cases} \quad (7)$$

もちろん厳密には x_G も変化しますがここでは無視しています. これでトリム状態から推力が変化したときの運動の式が得られました. これを用いて本問題を解析してみましょう.

推力が変化した場合, 運動の初期は変動しますが, 運動が収まった定常状態では(7)式の左辺は零となり, 次の関係式が得られます.

$$\begin{cases} -\Delta D - W \cdot \Delta \gamma / 57.3 + \Delta T = 0 \\ \Delta L + T_0 \cdot \Delta \alpha / 57.3 = 0 \\ -x_G \cdot \Delta L = 0 \end{cases} \quad (8)$$

従って、(8)式の3番目の式から

$$\Delta L = 0 \quad (9)$$

が得られます。これは**推力が変化しても定常状態では揚力は変化しない**ことを示しています。この(9)式を(8)式の2番目の式に代入すると

$$\Delta \alpha = 0 \quad (10)$$

が得られます。これは**推力が変化しても定常状態では迎角は変化しない**ことを示しています。推力が変化して力の釣り合い状態が変わっているのに、迎角が変化しないというのはなぜでしょうか。それは機体が推力が変化する前の釣り合い(トリム)状態にあるからです。トリム状態とは、昇降舵が作る尾翼揚力のモーメントと主翼揚力によるモーメントが釣り合っていて、機体の迎角を保つことなのです。この釣り合い迎角を決めている主翼と水平尾翼の揚力は、いずれも速度変化に対して同じ比率で変化するため、速度が変化してもトリム迎角は変わらないのです。

さて、揚力は速度変化と迎角変化により変化すると考えて良いので、次のように速度変化の影響と迎角変化の影響との和として表すことができます。

$$\Delta L = (L_V \cdot \Delta V + L_\alpha \cdot \Delta \alpha) / 57.3 \quad (11)$$

従って、(9)式と(10)式の結果を用いると(11)式から

$$\Delta V = 0 \quad (12)$$

が得られます。これは**推力が変化しても定常状態では速度は変化しない**ことを示しています。すなわち、推力がなくなっても航空機は速度を維持するようになっているのです。ではなぜ速度を維持できるのでしょうか。次にこれを考えてみましょう。

(8)式の1番目の式を変形してみましょう。抗力も速度変化と迎角変化により変化しますから、次のように速度変化の影響と迎角変化の影響との和として表すことができます。

$$\Delta D = D_V \cdot \Delta V + D_\alpha \cdot \Delta \alpha \quad (13)$$

一方、上昇角とピッチ姿勢角とは次の関係があります。

$$\Delta \gamma = \Delta \theta - \Delta \alpha \quad (14)$$

(13)式と(14)式を用いると、(8)式の1番目の式は次のように変形できます。

$$-D_V \cdot \Delta V - (D_\alpha - W / 57.3) \cdot \Delta \alpha - W \cdot \Delta \theta / 57.3 + \Delta T = 0 \quad (15)$$

ここで、(10)式と(12)式の結果を代入すると

$$-W \cdot \Delta \theta / 57.3 + \Delta T = 0 \quad \therefore \Delta \theta = \frac{57.3}{W} \Delta T \quad (16)$$

が得られます。これは、**推力が変化するとピッチ姿勢角が変化すること**

を示しています。その結果

$$\Delta\gamma = \Delta\theta \quad (\Delta\alpha = 0) \quad (17)$$

の関係により、**推力が減少** ($\Delta T < 0$) **した場合は機体は降下** ($\Delta\gamma < 0$) し、推力が増加 ($\Delta T > 0$) した場合は機体は上昇 ($\Delta\gamma > 0$) する。すなわち、**航空機は推力が変化した場合には自ら上昇または降下し、重力を利用して速度を維持するようになっている** のです。これは次のように解釈できます。推力が変化し、速度が変化しようとしてもトリム迎角は変わりませんから、例えば同じ迎角のまま降下して速度が増加した場合、揚力が増加しますから機体は上昇して速度は減少して元の速度に戻ります。逆に、同じ同じ迎角のまま上昇して速度が減少した場合、揚力が減少しますから機体は降下して速度は増加して元の速度に戻るというわけです。

それでは、速度を変化させたい場合はどうすれば良いのでしょうか。それは機体の迎角を変化させれば良いのです。それにはパイロットが昇降舵を動かしてトリム状態を変化させれば良いのです。これについては、別の項目で説明します。

以上