１．６　エンジン故障時の滑空飛行特性

H25(2013).9.7(A) 片柳亮二

全てのエンジンが故障し，推力が失われた場合，航空機は滑空飛行を余儀なくされます．いずれは地面に到達するわけですが，このときにすこしでも水平滑走距離をのばして，着陸できそうなところまでたどり着く方法について考えてみましょう．

（１）解析の基礎式

図１のような直線定常飛行時の釣合式を考えます．

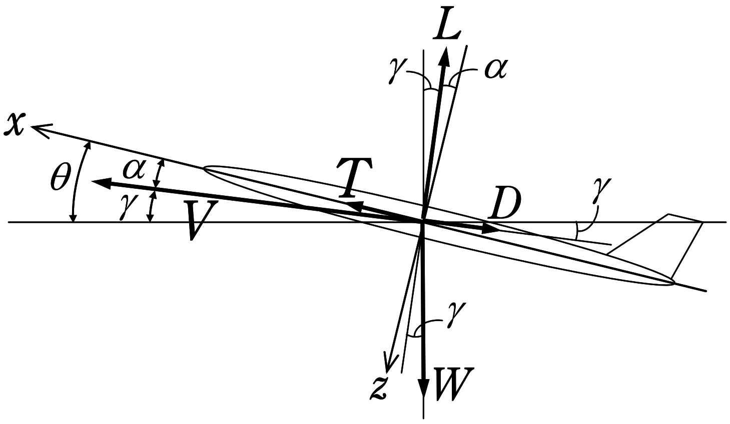

図１　直線定常飛行

このとき釣り合い式は次のように表されます．

$$\begin{cases} L+T\sin\alpha = W\cos\gamma \\ T\cos\alpha - D = W\sin\gamma \end{cases} \tag{1-1}$$

$$\therefore \gamma = \tan^{-1}\frac{T\cos\alpha - D}{L+T\sin\alpha} \tag{1-2}$$

ここで，γは飛行経路角，αは迎角，Lは揚力，Dは抗力，Tはエンジン推力です．

さて，エンジン推力がなくなった場合（$T=0$）の場合の滑空飛行について考えると，(1-2)式から次の降下角($-\gamma$)の式が得られます．

$$-\gamma = \tan^{-1}\frac{D}{L} \fallingdotseq \frac{C_D}{C_L}\times 57.3 \tag{1-3}$$

ここで，C_Lは揚力係数，C_Dは抗力係数です．このとき，(1-1)式は，次のように表されます．

$$\begin{cases} L = W\cos\gamma \fallingdotseq W \\ -D = W\sin\gamma \fallingdotseq W\cdot\gamma/57.3 \end{cases} \tag{1-4}$$

以下，(1-3)式および(1-4)式の近似式を用いて滑空時の飛行特性について考察しましょう．

さて，抗力係数は

$$C_D = C_{D0} + kC_L^2 \tag{1-5}$$

と表すことができます．ここで，右辺第１項は有害抗力の項，第２項は揚力に依存する項です．このとき，(1-3)式から降下角が次式で表されます．

$$-\gamma = \frac{C_D}{C_L}\times 57.3 = \left(\frac{C_{D0}}{C_L} + kC_L\right)\times 57.3 \tag{1-6}$$

釣り合いの機体速度（真対気速度）は，(1-4)式から

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho}}\cdot\sqrt{\frac{W/S}{C_L}} \quad (\mathrm{m/s}) \tag{1-7}$$

で与えられます．ここで，ρは空気密度(kgf･s²/m⁴)，W/Sは翼面荷重(kgf/m²)といわれるものです．一方，機体にかかる空気力は次式で表される動圧$\bar{q}$

$$\bar{q} = \frac{1}{2}\rho V^2 \tag{1-8}$$

が重要な役割を果たします．この動圧を海面上の空気密度ρ_0で換算した速度を等価対気速度V_Eといい，次式で表されます．

$$V_E = \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}}\cdot V \quad (\mathrm{m/s}) \tag{1-9}$$

ここで，(1-7)式を用い，速度の単位を kt で表した等価対気速度をV_{KEAS}と書くと

$$V_{KEAS} = 7.78\sqrt{\frac{W/S}{C_L}} \quad (\mathrm{kt}) \tag{1-10}$$

で与えられます．実際の操縦席の計器にはピトー管から計測された速度（指示対気速度）が示されますが，これは誤差を含むもののほぼ等価対気速度が示されているわけです．パイロットは計器に示されているこの速度（これを２乗して定数を掛けると動圧になる）を基準にして飛行しているわけです．

機体の降下率($-\dot{h}$)は，(1-5)式，(1-6)式および(1-7)式を用いると次式で与えられます．

$$-\dot{h} = V\cdot\frac{-\gamma}{57.3} = \sqrt{\frac{2W/S}{\rho}}\cdot\left(C_{D0}C_L^{-3/2} + kC_L^{1/2}\right) \quad (\mathrm{m/s}) \tag{1-11}$$

降下率の単位を ft/minute（操縦席にはこの計器がある）で表すと次のようになます．

$$-\dot{h}_{fpm} = 278\sqrt{\frac{W/S}{\rho}}\cdot\left(\frac{C_{D0}}{C_L\sqrt{C_L}} + k\sqrt{C_L}\right) \quad (\mathrm{ft/minute}) \tag{1-12}$$

（２）降下角最小の条件

降下角が最小となる条件を求めてみましょう．(1-6)式をC_Lで微分すると降下角が最小となる条件式として次式が得られます．

$$C_{L1}=\sqrt{\frac{C_{D0}}{k}} \qquad (2\text{-}1)$$

この条件は，揚抗比(C_L/C_D)最大の条件です．このとき，降下角は次式で与えらます．

$$-\gamma_1=114.6\sqrt{kC_{D0}} \quad (\mathrm{deg}) \qquad (2\text{-}2)$$

この降下角最小の時の抗力係数は，有害抗力の項と揚力に依存する項とが等しくなっています．

（３）降下率最小の条件

降下率が最小になる条件を求めてみよう．(1-11)式をC_Lで微分すると降下率が最小となる条件として次式が得られます．

$$C_{L2}=\sqrt{\frac{3C_{D0}}{k}}=1.732\,C_{L1} \qquad (3\text{-}1)$$

このとき,降下率が最小となる降下角は,(1-6)式より次式で与えらます．

$$-\gamma_2=132.3\sqrt{kC_{D0}}=1.15\,(-\gamma_1) \quad (\mathrm{deg}) \qquad (3\text{-}2)$$

すなわち，降下率が最小となる降下角は，降下角最小値の 15%増であることが分かります.降下率が最小の場合には滑空時間が最大になります．しかし，次項で述べるように，滑空時間が最大となっても水平到達距離は最大とはなりません．

（４）水平到達距離最大の条件

滑空飛行時は，適当な着陸場所までたどり着くために，水平到達距離を長くするように飛行することが重要となります．その条件を求めてみましょう．

高度h_A(ft)からh_B(ft)まで滑空する場合の水平到達距離Rは次のように表されます．

$$R=\frac{57.3}{-\gamma}\cdot\frac{h_A-h_B}{6076} \quad (\mathrm{nm}) \qquad (4\text{-}1)$$

水平到達距離が最大となるのは，降下角最小のとき，すなわち揚抗比(C_L/C_D)最大のときで

$$C_{L1}=\sqrt{\frac{C_{D0}}{k}} \qquad (4\text{-}2)$$

の場合です．このときの降下角の式を用いると，水平到達距離の最大値

$R_{\max}$が次式で得られます．

$$R_{\max} = \frac{1}{\sqrt{kC_{D0}}} \cdot \frac{h_A - h_B}{12150} \quad \text{(nm)} \qquad (4\text{-}3)$$

（５）滑空時の平均降下率および平均降下速度

高度h_A(ft)からh_B(ft)まで滑空する場合を考えると，高度が減少してくると，空気密度ρが増加し，降下率は(1-12)式に示すように減少します．いまその高度の密度をρ_Aおよびρ_Bとすると，その間の降下率の平均値が次式で近似できます．

$$(-\dot{h}_{fpm})_{平均} = 139\left(\frac{1}{\sqrt{\rho_A}} + \frac{1}{\sqrt{\rho_B}}\right)\sqrt{\frac{W}{S}} \cdot \left(\frac{C_{D0}}{C_L\sqrt{C_L}} + k\sqrt{C_L}\right) \quad \text{(ft/minute)} \qquad (5\text{-}1)$$

このとき，滑空時間は次式で与えられます．

$$t_{AB} = \frac{h_A - h_B}{(-\dot{h}_{fpm})_{平均}} \quad \text{(minute)} \qquad (5\text{-}2)$$

真対気速度Vも同様に平均で考えると，(1-7)式から次のように近似できます．

$$(V)_{平均} = 2.75\left(\frac{1}{\sqrt{\rho_A}} + \frac{1}{\sqrt{\rho_B}}\right)\sqrt{\frac{W/S}{C_L}} \quad \text{(kt)} \qquad (5\text{-}3)$$

なお，等価対気速度V_{KEAS}は(1-10)式で示すようにρに無関係であるので，滑空飛行中一定値です．

（６）滑空飛行の手順と原理

滑空飛行の条件がどのように決まっていくか，その手順をみてみると以下のようになります．

①パイロットが操縦桿またはトリムを操作する．
② その結果，釣り合い迎角αとそれに対応する揚力係数C_Lが決まる．
③ (1-7)式および(1-10)式から速度VおよびV_{KEAS}が決まる．
④ (1-6)式から降下角$(-\gamma)$が決まる．
⑤ これらにより，降下率，滑空時間，水平到達距離が決まる．

（７）例題

さて，例題として翼面荷重W/Sが次の２種類の機体が，高度 10,000ft から滑空飛行する場合を実際に計算してみましょう．

$$W/S = 500\,(\mathrm{kgf/m^2}) \quad \text{（大型民間機）} \tag{7-1}$$
$$= 70\,(\mathrm{kgf/m^2}) \quad \text{（軽飛行機）} \tag{7-2}$$

ただし，空力特性は両機とも同じで次式と仮定しましょう．

$$C_L = 0.1\alpha, \qquad k = 0.06, \qquad C_{D0} = 0.02 \quad \text{（両機共通）} \tag{7-3}$$

このとき，降下角の式は(1-6)式から次のようになります．

$$-\gamma = \frac{11.46}{\alpha} + 0.344\alpha \quad (\mathrm{deg}) \quad \text{（両機共通）} \tag{7-4}$$

一方，等価対気速度は(1-13)式から次のようになります．

$$\begin{aligned} V_{KEAS} &= \frac{550}{\sqrt{\alpha}} \quad (\mathrm{kt}) \quad \text{（大型民間機）} \\ &= \frac{206}{\sqrt{\alpha}} \quad (\mathrm{kt}) \quad \text{（軽飛行機）} \end{aligned} \tag{7-5}$$

ここで，迎角αは deg 単位である．(7-4)式および(7-5)式から，空力特性が同じであれば，降下角($-\gamma$)は両機同じで，速度V_{KEAS}は翼面荷重の平方根の比となることが分かります．

<u>降下角最小の場合</u>

揚力係数は(2-1)式から

$$C_{L1} = \sqrt{\frac{C_{D0}}{k}} = 0.577, \quad (\alpha = 5.77°) \quad \text{（両機共通）} \tag{7-6}$$

となります．このとき，降下角最小値は(2-2)式から

$$-\gamma_1 = 114.6\sqrt{kC_{D0}} = 4.0 \ (\mathrm{deg}) \quad \text{（両機共通）} \tag{7-7}$$

となります．また，速度は(7-5)式から

$$\begin{aligned} V_{KEAS} &= 229 \ (\mathrm{kt}) \quad \text{（大型民間機），} \\ &= 86 \ (\mathrm{kt}) \quad \text{（軽飛行機）} \end{aligned} \tag{7-8}$$

となります．

水平到達距離（最大値）は高度 10,000ft からの滑空飛行とすると，(4-3)式から

$$R_{\max} = \frac{1}{\sqrt{kC_{D0}}} \cdot \frac{h_A - h_B}{12150} = 23.8 \quad (\mathrm{nm}) \quad \text{（両機共通）} \tag{7-9}$$

が得られます．

平均降下率は，(5-1)式から

$$\begin{aligned} (-\dot{h}_{\mathrm{fpm}})_{\text{平均}} &= 1740 \ (\mathrm{fpm}) \ \text{（大型民間機）} \\ &= 650 \ (\mathrm{fpm}) \ \text{（軽飛行機）} \end{aligned} \tag{7-10}$$

従って，滞空時間は(5-2)式から

$$\begin{aligned} t_{AB} &= 5.7 \ \text{(分)} \ \text{（大型民間機）} \\ &= 15.4 \ \text{(分)} \ \text{（軽飛行機）} \end{aligned} \tag{7-11}$$

となります．

<u>降下率が最小の場合</u>

揚力係数は(3-2)式から

$C_{L_2} = 1.732\, C_{L_1} = 1.00$, $(\alpha = 10°)$ （両機共通） (7-12)

となります．このとき，降下率が最小となる降下角は(3-2)式から

$-\gamma_2 = 1.15\,(-\gamma_1) = 4.6$ (deg) （両機共通） (7-13)

となります．また，速度は(7-5)式から

$V_{KEAS} = 174$ (kt) （大型民間機），
$= 65$ (kt) （軽飛行機） (7-14)

となります．

平均降下率は，(5-1)式から

$(-\dot{h}_{\mathrm{fpm}})_{平均} = 1520$ (fpm) （大型民間機）
$= 570$ (fpm) （軽飛行機） (7-15)

従って，滞空時間は(5-2)式から

$t_{AB} = 6.6$ (分) （大型民間機）
$= 17.5$ (分) （軽飛行機） (7-16)

となります．

以上