

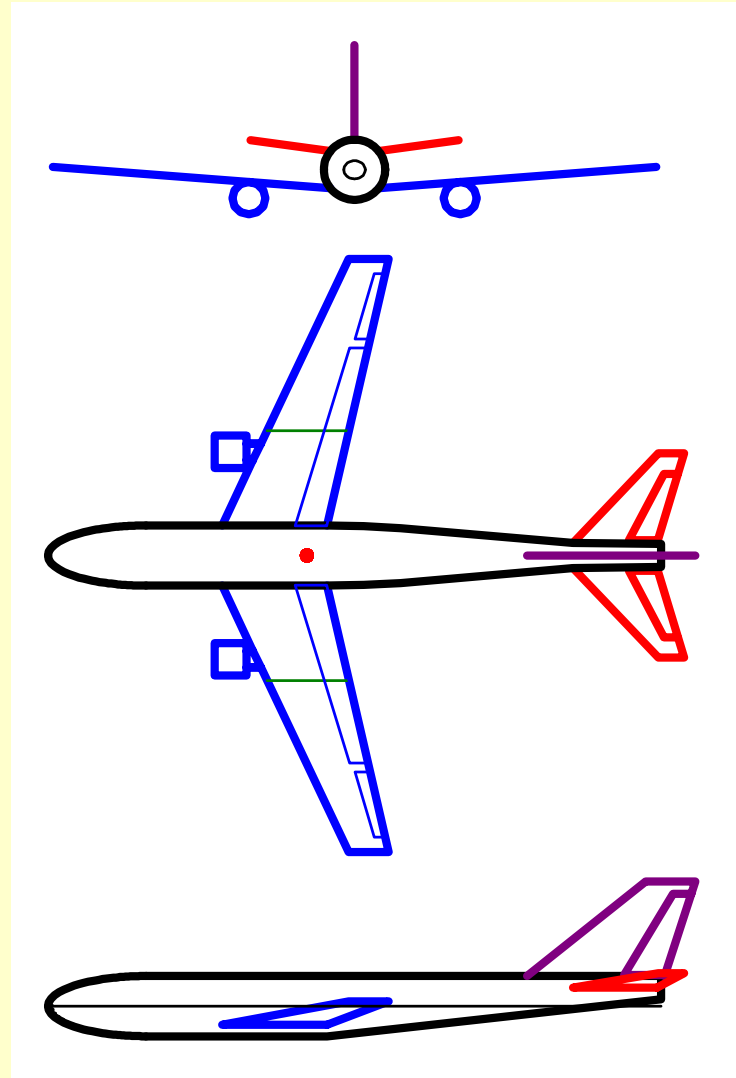
航空機のスピン運動の発達と 回避操舵について

片柳亮二

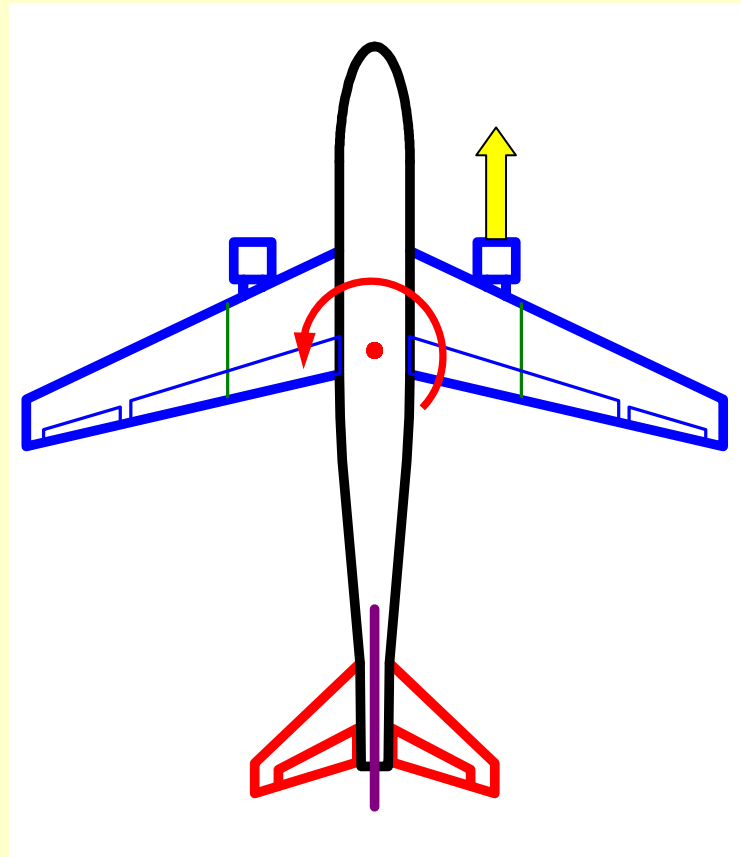
機体例の主要諸元と3面図

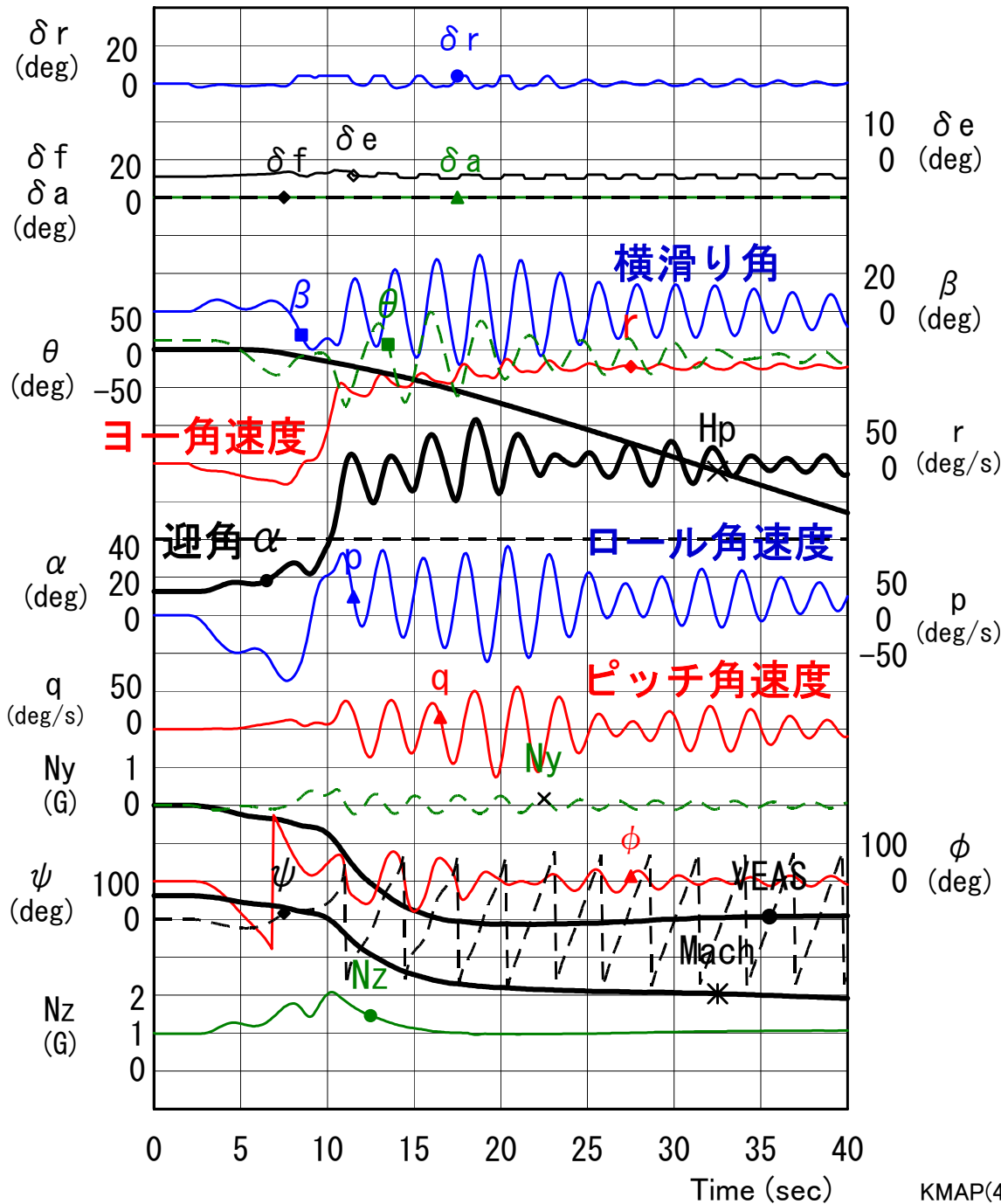
10人乗りの旅客機

機体重量	7.1 (tf)
主翼面積	20.7 (m ²)
スパン	12.8 (m)
胴体長	13.0 (m)



左エンジンアウト時にラダーの当て舵
ができなかった場合を考える





(40,000ft, 160kt)

- t=2秒で, 左エンジンアウト
- t=10秒で, 右エンジンの推力も0

図2.2 エンジンアウト時のスピン運動
(SPIN. 航空機のスピン運動31. Y160828. DAT)



(40, 000ft, 160kt)

- t=2秒で, 左エンジンアウト
- t=10秒で, 右エンジンの推力も0

図2.2 エンジンアウト時のスピン運動

(SPIN. 航空機のスピン運動31. Y160828. DAT)

スピン運動計算用の運動方程式と空力係数(1/4)

非線形6自由度運動方程式 (並進運動)

$$\begin{cases} \dot{u} = -\frac{q}{57.3}w + \frac{r}{57.3}v - g \sin \theta & + \frac{T}{m} \cos i_T + \frac{\rho V^2 S}{2m} C_x \\ \dot{v} = -\frac{r}{57.3}u + \frac{p}{57.3}w + g \cos \theta \sin \phi & + \frac{\rho V^2 S}{2m} C_y \\ \dot{w} = -\frac{p}{57.3}v + \frac{q}{57.3}u + g \cos \theta \cos \phi - \frac{T}{m} \sin i_T & + \frac{\rho V^2 S}{2m} C_z \end{cases}$$

スピン運動計算用の運動方程式と空力係数(2/)

非線形6自由度運動方程式 (回転運動)

$$\begin{cases} \dot{p} = \left(\frac{L}{I_x} + \frac{I_{xz}}{I_x} \cdot \frac{N}{I_z} \right) / \left(1 - \frac{I_{xz}^2}{I_x I_z} \right) \\ \dot{q} = \frac{M}{I_y} \\ \dot{r} = \left(\frac{N}{I_z} + \frac{I_{xz}}{I_z} \cdot \frac{L}{I_x} \right) / \left(1 - \frac{I_{xz}^2}{I_x I_z} \right) \end{cases}$$

ただし,

$$\begin{cases} L = -(I_z - I_y) \cdot \frac{qr}{57.3} + I_{xz} \frac{pq}{57.3} + \frac{\rho V^2 S b}{2} \times 57.3 \cdot C_l \\ M = (I_z - I_x) \cdot \frac{rp}{57.3} + I_{xz} \frac{r^2 - p^2}{57.3} + \frac{\rho V^2 S \bar{c}}{2} \times 57.3 \cdot C_m \\ N = -(I_y - I_x) \cdot \frac{pq}{57.3} - I_{xz} \frac{qr}{57.3} + \frac{\rho V^2 S b}{2} \times 57.3 \cdot C_n \end{cases}$$

スピン運動計算用の運動方程式と空力係数 (3/)

非線形6自由度運動方程式 (空力係数)

$$\left\{ \begin{array}{l} f(\alpha) = C_{l_{\dot{\alpha}}}, C_{l_p}, C_{l_r}, C_{m_{\dot{\alpha}}}, C_{m_{\dot{\gamma}}}, \\ C_{m_q}, C_{m_{\dot{\alpha}}}, C_{n_{\dot{\alpha}}}, C_{n_p}, \\ C_D, C_{D_{|\dot{\alpha}|}}, C_{D_{|\dot{\gamma}|}}, C_{L_{\dot{\alpha}}}, C_{L_{\dot{\gamma}}} \\ f(\alpha, \delta e) = C_{n_r}, C_{n_{\delta r}}, C_{l_{\delta r}}, C_{y_{\delta r}} \\ f(\alpha, \beta) = C_l, C_m, C_n, C_y, C_L \end{array} \right. \quad (3.4)$$

スピン運動計算用の運動方程式と空力係数 (4/4)

非線形6自由度運動方程式 (空力係数)

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = -90^\circ \sim 90^\circ \text{ (} 5^\circ \text{ 間隔)} \\ \beta = 0, \pm 5^\circ, \pm 10^\circ, \pm 20^\circ, \pm 30^\circ \\ \delta e = \text{引き最大, 中立, 押し最大} \end{array} \right.$$

スピン運動を把握するための迎角変化率

非線形6自由度運動方程式

$$\dot{w} = -\frac{p}{57.3}v + \frac{q}{57.3}u + g \cos \theta \cos \phi - \frac{T}{m} \sin i_T + \frac{\rho V^2 S}{2m} C_z$$

$$\dot{u} = -\frac{q}{57.3}w + \frac{r}{57.3}v - g \sin \theta + \frac{T}{m} \cos i_T + \frac{\rho V^2 S}{2m} C_x$$

$$\begin{cases} V = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \\ u = V \cos \beta \cos \alpha \\ v = V \sin \beta \\ w = V \cos \beta \sin \alpha \end{cases}$$

運動把握のための迎角変化率

$$\dot{\alpha} = 57.3 \frac{\dot{w}u - w\dot{u}}{u^2 + w^2} \quad (\text{この式を求めることにより})$$

$$= q - p \tan \beta \cos \alpha - r \tan \beta \sin \alpha$$

$$+ \frac{57.3g \cos \alpha}{V \cos \beta} \cos \theta \cos \phi + \frac{57.3g \cos \alpha}{V \cos \beta} \cdot \frac{\rho V^2 S}{2W} C_z$$

$$+ \frac{57.3g \sin \alpha}{V \cos \beta} \sin \theta - \frac{57.3g \sin \alpha}{V \cos \beta} \cdot \frac{\rho V^2 S}{2W} C_x$$

スピン運動を把握するための横滑り角変化率

非線形6自由度運動方程式

$$\dot{v} = -\frac{r}{57.3}u + \frac{p}{57.3}w + g \cos \theta \sin \phi + \frac{\rho V^2 S}{2m} C_y$$

$$\beta = 57.3 \sin^{-1} \frac{v}{V}$$

$$\begin{cases} V = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \\ u = V \cos \beta \cos \alpha \\ v = V \sin \beta \\ w = V \cos \beta \sin \alpha \end{cases}$$

運動把握のための横滑り角変化率

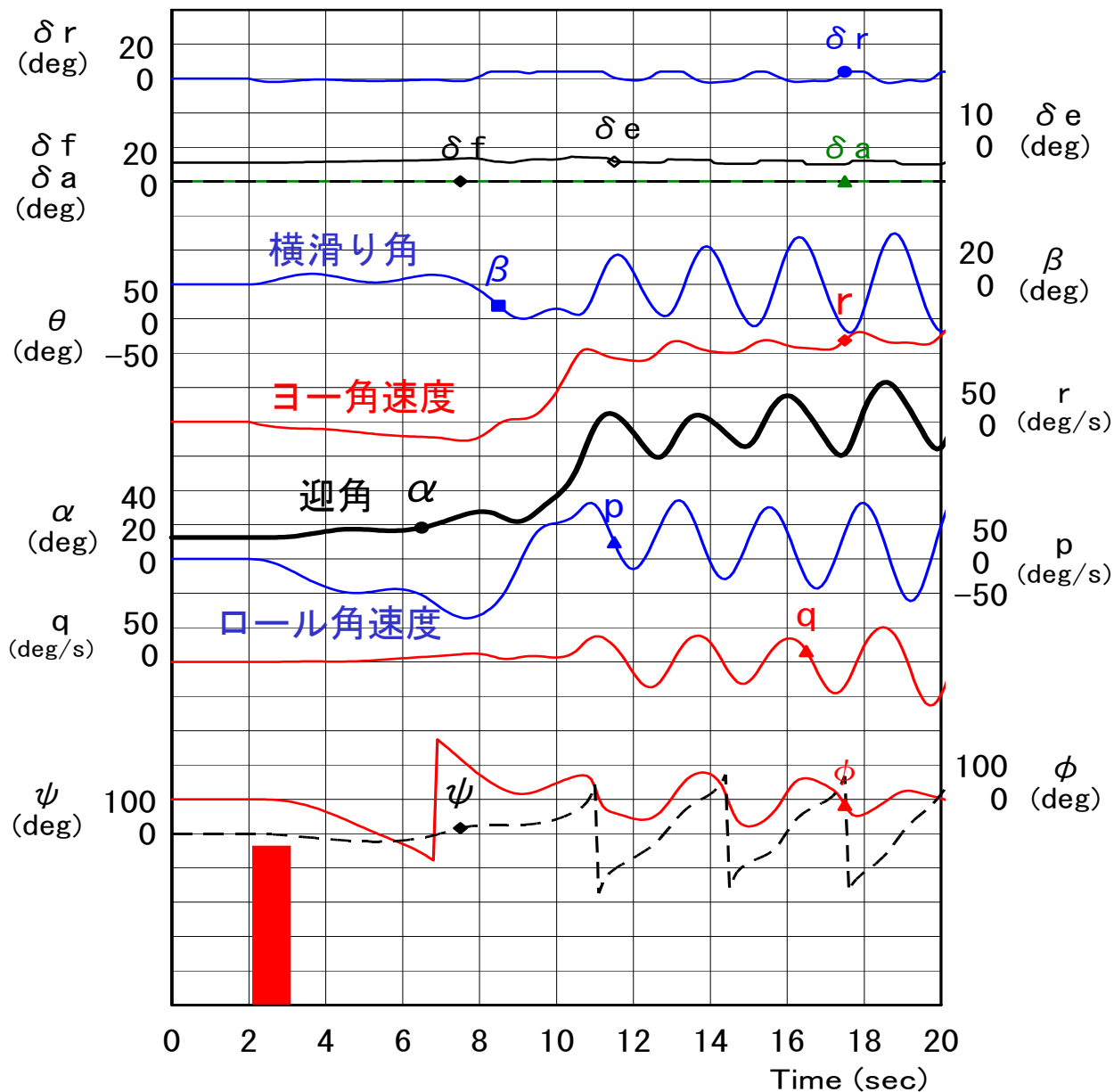
($v = V \sin \beta$ を微分することにより)

$$\begin{aligned} \dot{\beta} = & -r \cos \alpha + p \sin \alpha \\ & + \frac{57.3g}{V \cos \beta} \cos \theta \sin \phi + \frac{57.3g}{V \cos \beta} \cdot \frac{\rho V^2 S}{2W} C_y \end{aligned}$$

運動を把握するための迎角，横滑り角の変化率をまとめると，

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\alpha} = q - p \tan \beta \cos \alpha - r \tan \beta \sin \alpha \\ + \frac{57.3g \cos \alpha}{V \cos \beta} \cos \theta \cos \phi + \frac{57.3g \cos \alpha}{V \cos \beta} \cdot \frac{\rho V^2 S}{2W} C_z \\ + \frac{57.3g \sin \alpha}{V \cos \beta} \sin \theta - \frac{57.3g \sin \alpha}{V \cos \beta} \cdot \frac{\rho V^2 S}{2W} C_x \end{array} \right. \quad (4.1)$$

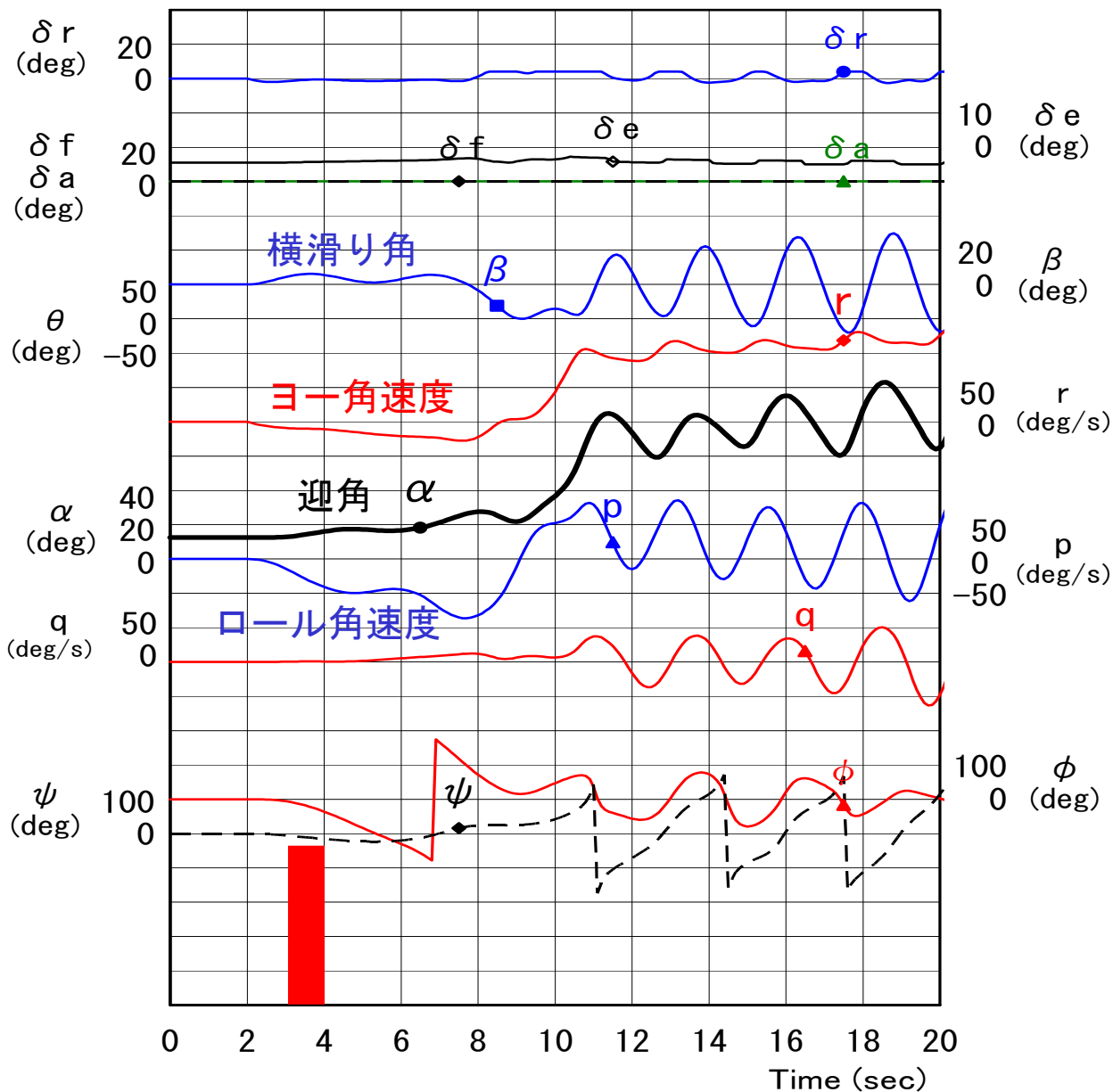
$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\beta} = -r \cos \alpha + p \sin \alpha \\ + \frac{57.3g}{V \cos \beta} \cos \theta \sin \phi + \frac{57.3g}{V \cos \beta} \cdot \frac{\rho V^2 S}{2W} C_y \end{array} \right. \quad (4.2)$$



① (t=2~3秒) :
 t=2秒に左エンジン
 が故障したため、
ヨー角速度が負に
 (機首を左に振るよ
 うに)発生。
 その結果、横滑り
角が正に(右に滑る
 ように)発生する。

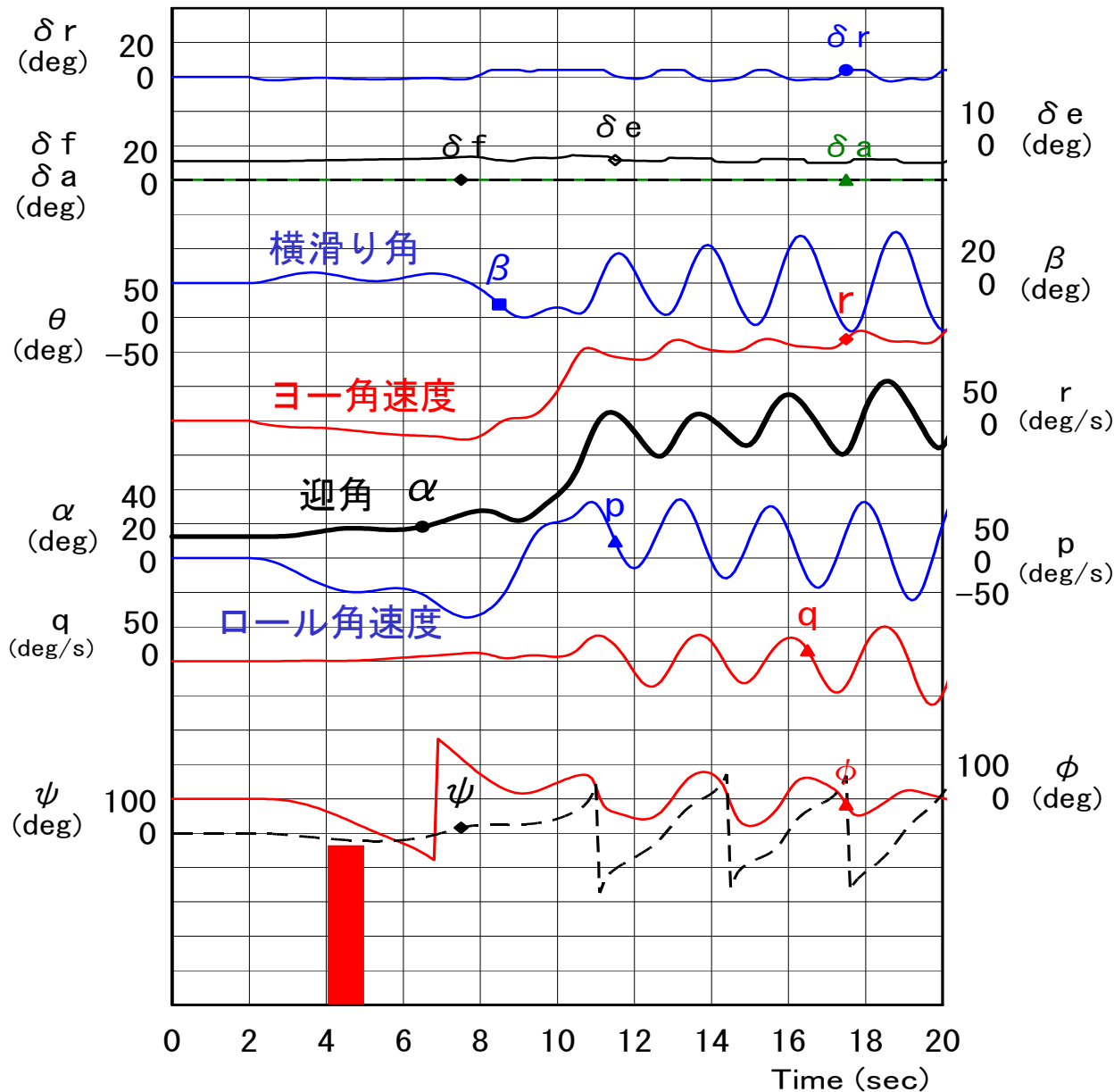
$$\dot{\beta} \doteq -r \cos \alpha + p \sin \alpha$$

図4.1 スピン運動(図2.2)の前半部



② (t=3~4秒) :
 t=3秒では横滑り角が4.4°となる。
 この横滑り角の発生は、上反角効果により左ロール運動を生じさせ、
 t=4秒ではロール角速度が-50 (deg/s)となる。

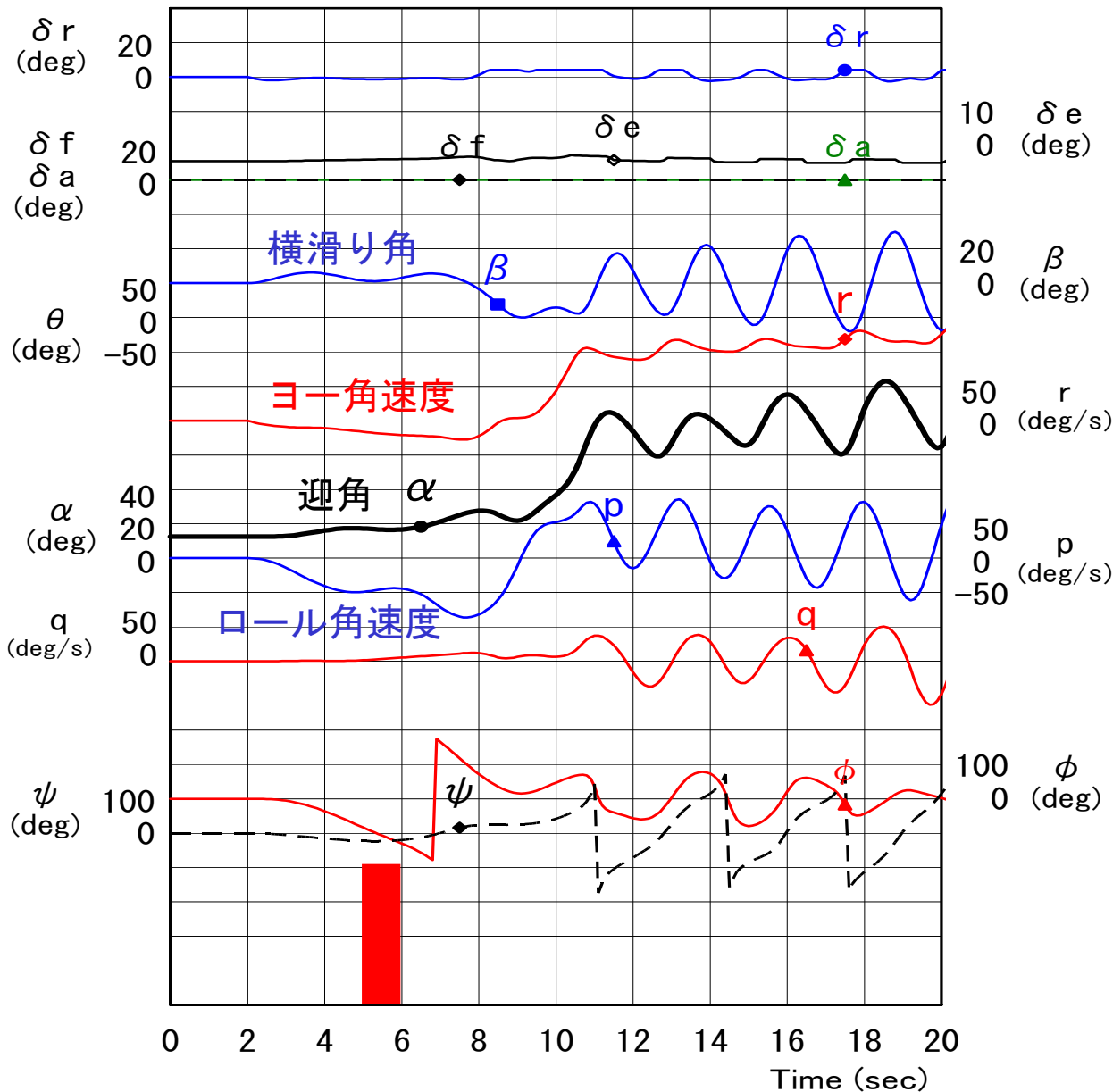
図4.1 スピン運動(図2.2)の前半部



③ (t=4~5秒) :
この大きな左ロール運動の結果、横滑り角が減少していく。

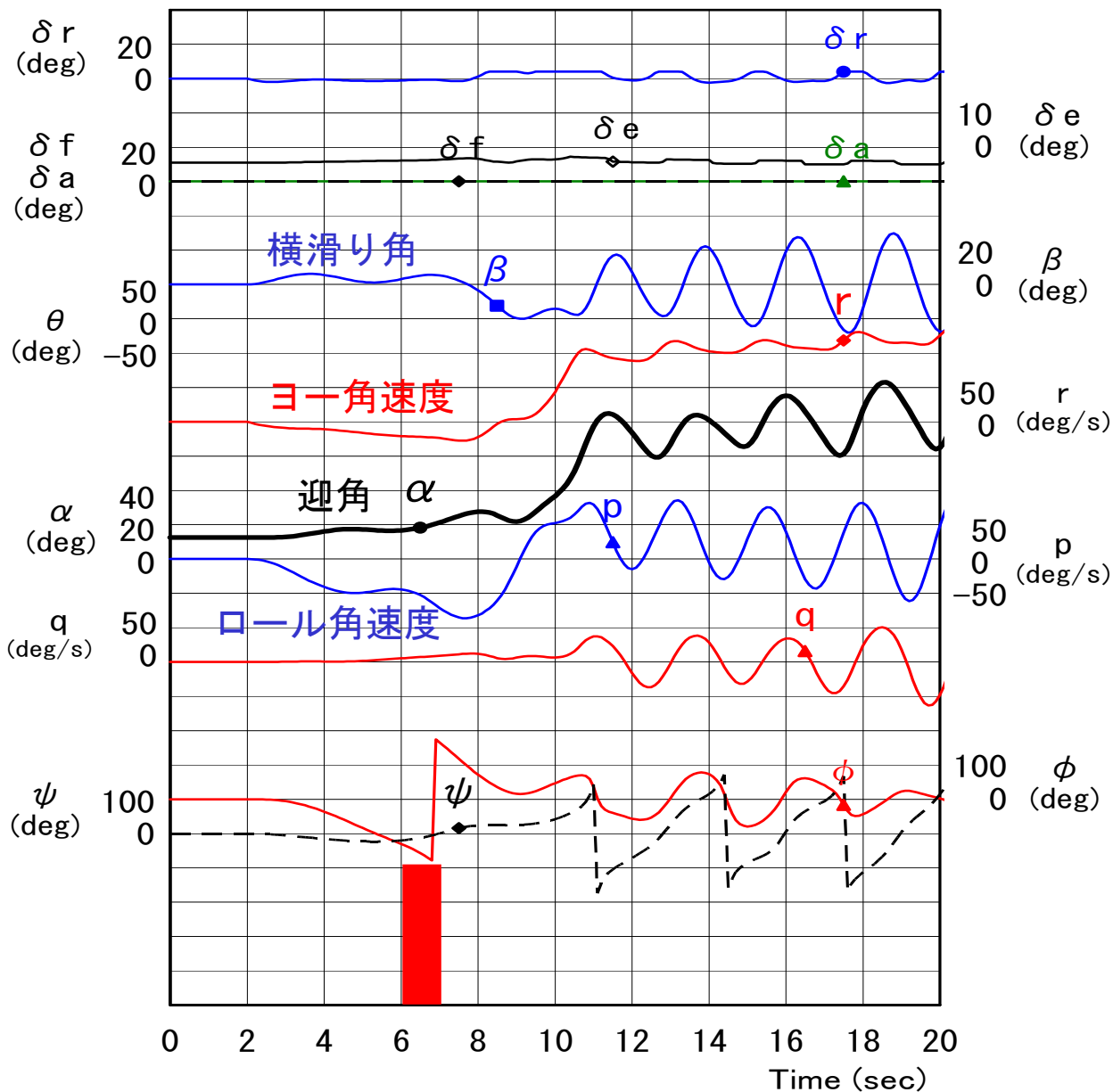
$$\dot{\beta} \doteq -r \cos \alpha + p \sin \alpha$$

図4.1 スピン運動(図2.2)の前半部



④ ($t=5\sim 6$ 秒) :
 上反角効果が弱まることから、ロール角速度が一定となるが、ヨー角速度はエンジンアウトのモーメントにより負に増加し続けるため、再び横滑り角が正に増加し始める。

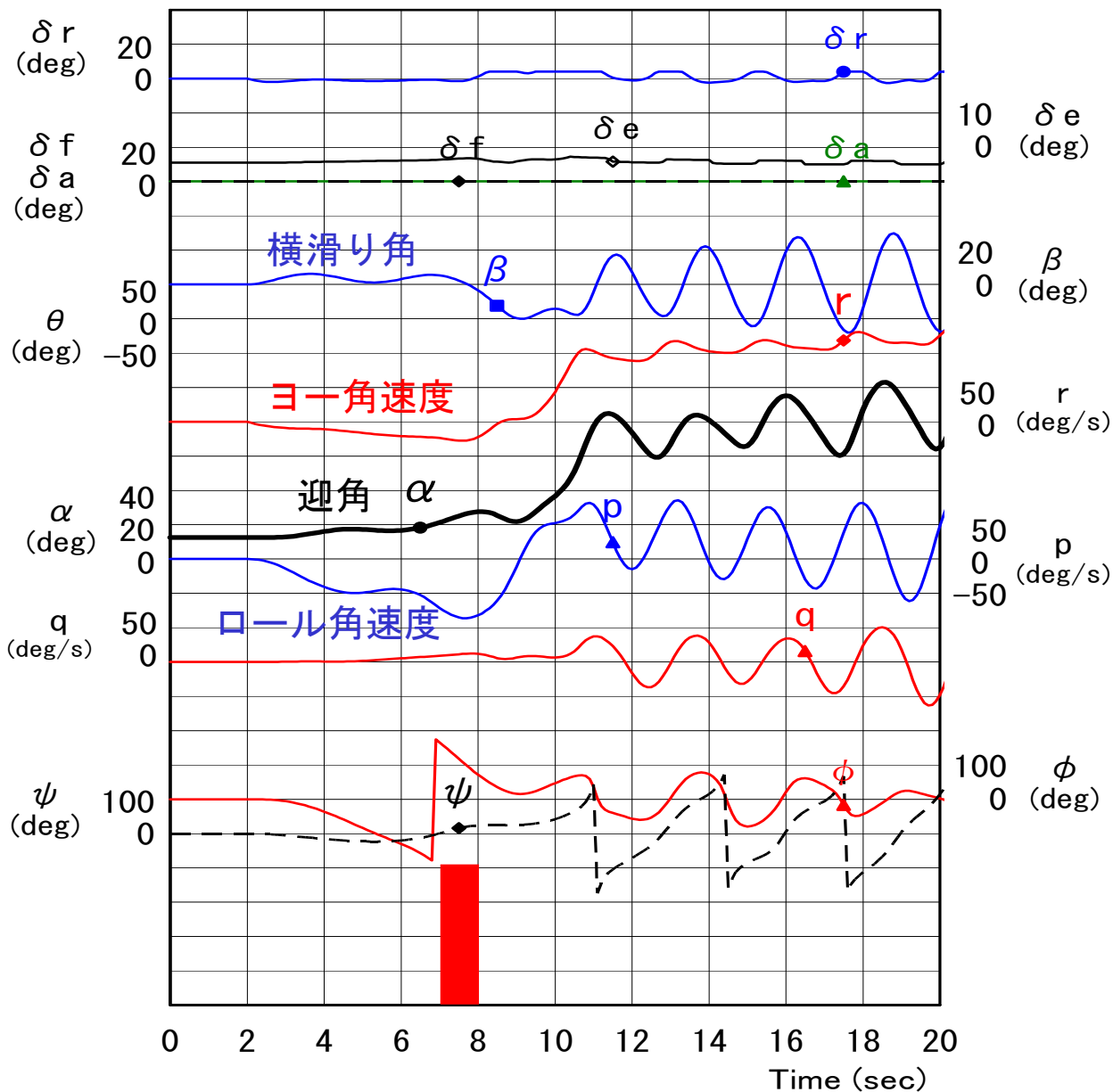
図4.1 スピン運動(図2.2)の前半部



⑤ (t=6~7秒) :
 その結果, 増加した正の横滑り角による上反角効果で, 再び左ロールの運動が大きくなる.
 また, この左ロール運動と正の横滑り角の結果, 迎角が増加していく.

$$\dot{\alpha} \doteq q - p \tan \beta \cos \alpha - r \tan \beta \sin \alpha$$

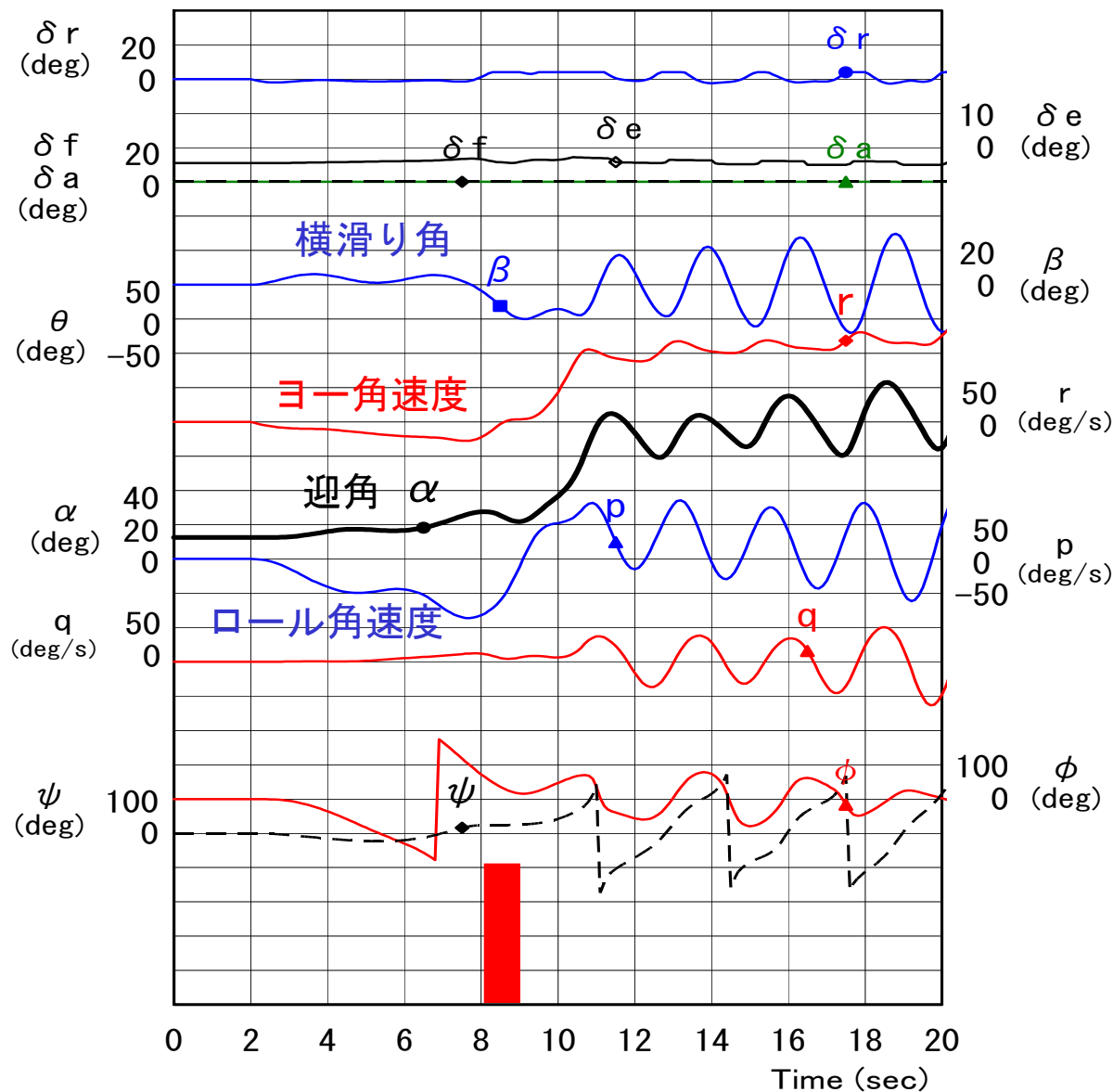
図4.1 スピン運動(図2.2)の前半部



⑥ ($t=7\sim 8$ 秒) :
 左ロール運動と迎角は増加して、
 $t=8$ 秒にはロール速度が -82 (deg/s)、
迎角が 28° に達する。
 同時に、横滑り角は減少して、 $t=8$ 秒
 には -3° の値になる。

$$\dot{\beta} \doteq -r \cos \alpha + p \sin \alpha$$

図4.1 スピン運動(図2.2)の前半部



⑦ ($t=8\sim 9$ 秒) :

迎角が 20° 以上では、
 方向安定が負になるが、
 $t=8$ 秒から横滑り角が負
 になったため、ヨー角速
 度が正になる側に発達
 していき、
 $t=9$ 秒にはヨー角速度は
 正の値となる。一方、
 横滑り角は -20° と大き
 な負の値となるが、こ
 のときも上反角効果は
 十分あるので左ロール
 運動が減少していき、
 ロール角速度は -11
 (deg/s)まで減少する。

図4.1 スピン運動(図2.2)の前半部

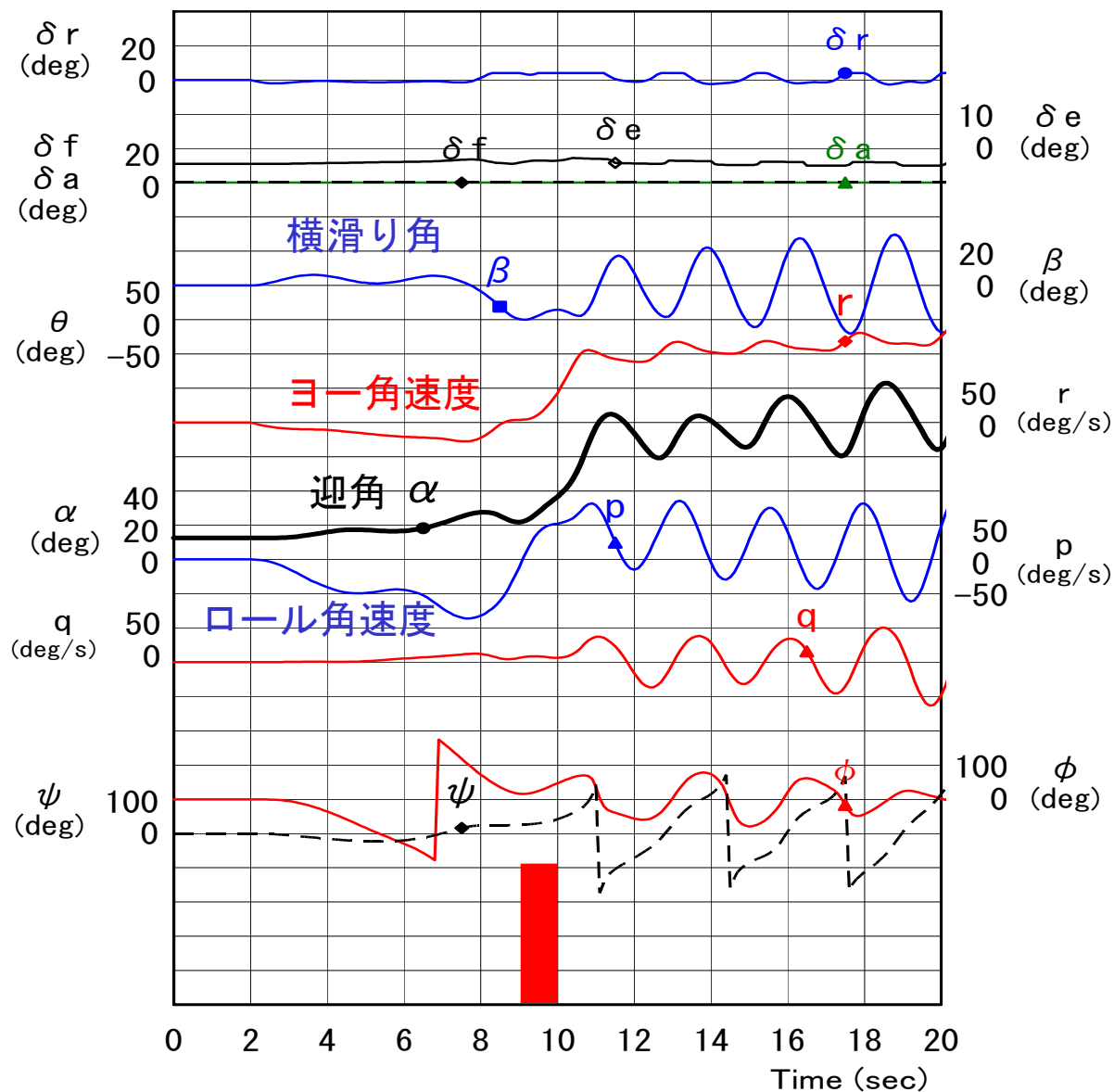
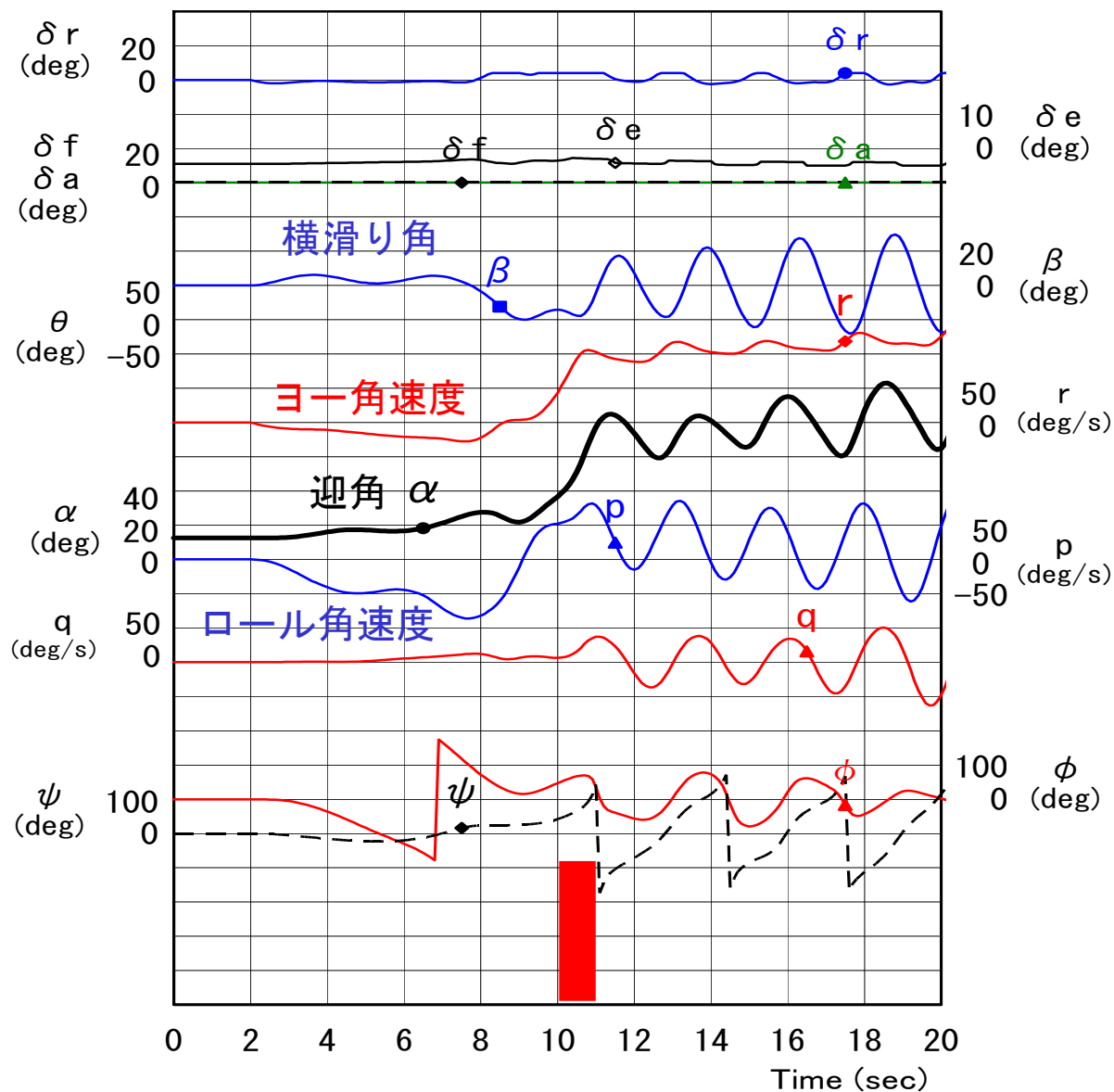


図4.1 スピン運動(図2.2)の前半部

⑧ (t=9~10秒) :
 左ロール運動の減少はさらに続き, その後右ロール運動に転じ, t=10秒では52 (deg/s)の大きな右ロール運動となる. その結果, 迎角が急激な増加傾向となる.
 一方, ヨ一角速度も方向不安定によってさらに正の運動になり, t=10秒では43 (deg/s)まで発達する.

$$\dot{\alpha} \doteq q - p \tan \beta \cos \alpha - r \tan \beta \sin \alpha$$



⑨ (t=10~11秒) :
迎角はさらに増加傾向を示し, t=11秒では77°に達する. また, 右ロール運動も右ヨー運動も増加して, t=11秒ではロール角速度は79 (deg/s), ヨー角速度は103 (deg/s)まで発達する. その結果, 横滑り角は, 大きな負の値からt=11秒では-4.4°まで減少する. なお, t=10秒以降, エンジンアウトによるヨーイングモーメントはない.

図4.1 スピン運動(図2.2)の前半部

⑩ (t=11秒の状態を確認) (1/2)

$$\alpha = 77^\circ, \quad \beta = -4.4^\circ, \quad p = 79 \text{ (deg/s)},$$

$$q = 37 \text{ (deg/s)}, \quad r = 103 \text{ (deg/s)}$$

$$\dot{\alpha} = \boxed{q} - p \tan \beta \cos \alpha - r \tan \beta \sin \alpha$$

$$+ \frac{57.3g \cos \alpha}{V \cos \beta} \cos \theta \cos \phi + \frac{57.3g \cos \alpha}{V \cos \beta} \cdot \frac{\rho V^2 S}{2W} C_z$$

$$+ \frac{57.3g \sin \alpha}{V \cos \beta} \sin \theta - \frac{57.3g \sin \alpha}{V \cos \beta} \cdot \frac{\rho V^2 S}{2W} C_x$$

$$= \boxed{37.1} + 1.35 + \boxed{7.8} + 0.19 - 1.69 - 3.9 - 0.22$$

$$= 40.6 \text{ (deg/s)}$$

α の変化率は q と r の影響大

$$\dot{\beta} = \boxed{-r \cos \alpha} + \boxed{p \sin \alpha}$$

$$+ \frac{57.3g}{V \cos \beta} \cos \theta \sin \phi + \frac{57.3g}{V \cos \beta} \cdot \frac{\rho V^2 S}{2W} C_y$$

$$= \boxed{-22.7} + \boxed{77.2} + 0.64 + 0.26$$

$$= 55.4 \text{ (deg/s)}$$

β の変化率は r と p の影響大

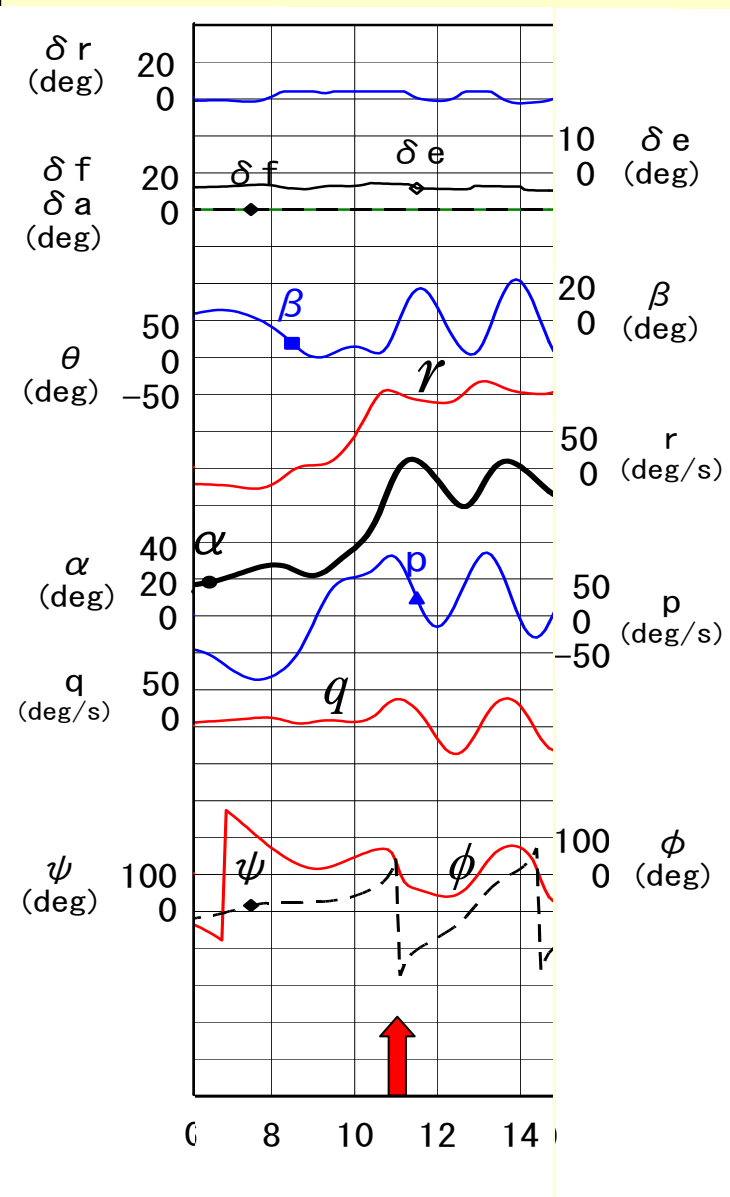


図4.1 スピン運動(図2.2)の前半部

⑩ (t=11秒の状態を確認) (2/2)

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{L}{57.3} &= \frac{-(I_z - I_y) \cdot qr}{57.3^2} + I_{xz} \frac{pq}{57.3^2} + \frac{\rho V^2 S b}{2} C_l \\ &= \boxed{-2260} + 209 + 274 = -1780 \\ \frac{M}{57.3} &= \frac{(I_z - I_x) \cdot rp}{57.3^2} + I_{xz} \frac{r^2 - p^2}{57.3^2} + \frac{\rho V^2 S \bar{c}}{2} C_m \\ &= \boxed{12480} + 307 \boxed{-11800} = 990 \\ \frac{N}{57.3} &= \frac{-(I_y - I_x) \cdot pq}{57.3^2} - I_{xz} \frac{qr}{57.3^2} + \frac{\rho V^2 S b}{2} C_n \\ &= \boxed{-2760} - 271 + 308 = -2720 \end{aligned} \right. \quad (4.5)$$

ピッチングモーメント M は
空力係数 C_m の影響も大

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{p} &\approx \frac{L}{I_x} + \frac{I_{xz}}{I_x} \cdot \frac{N}{I_z} \\ &= \boxed{-44} - 2 = -46 \text{ (deg/s)} \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{q} &= \frac{M}{I_y} = 10 \text{ (deg/s)} \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{r} &\approx \frac{N}{I_z} + \frac{I_{xz}}{I_z} \cdot \frac{L}{I_x} \\ &= \boxed{-21.2} - 1.4 = -23 \text{ (deg/s)} \end{aligned} \right.$$

p, q, r の変化率は、
それぞれ慣性連成項
 qr, rp, pq の影響大

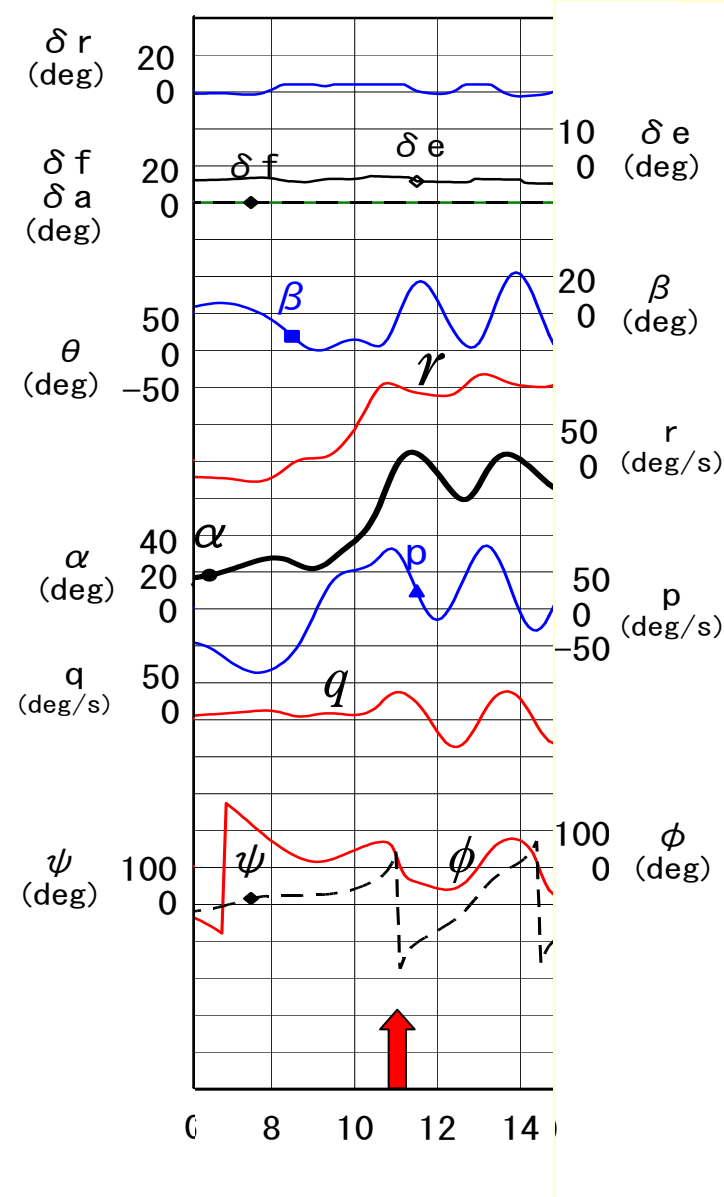


図4.1 スピン運動(図2.2)の前半部

⑪ (t=12秒の状態を確認) (1/2)

$\alpha = 74^\circ$, $\beta = 7.2^\circ$, $p = -15$ (deg/s),
 $q = -15$ (deg/s) , $r = 89$ (deg/s)

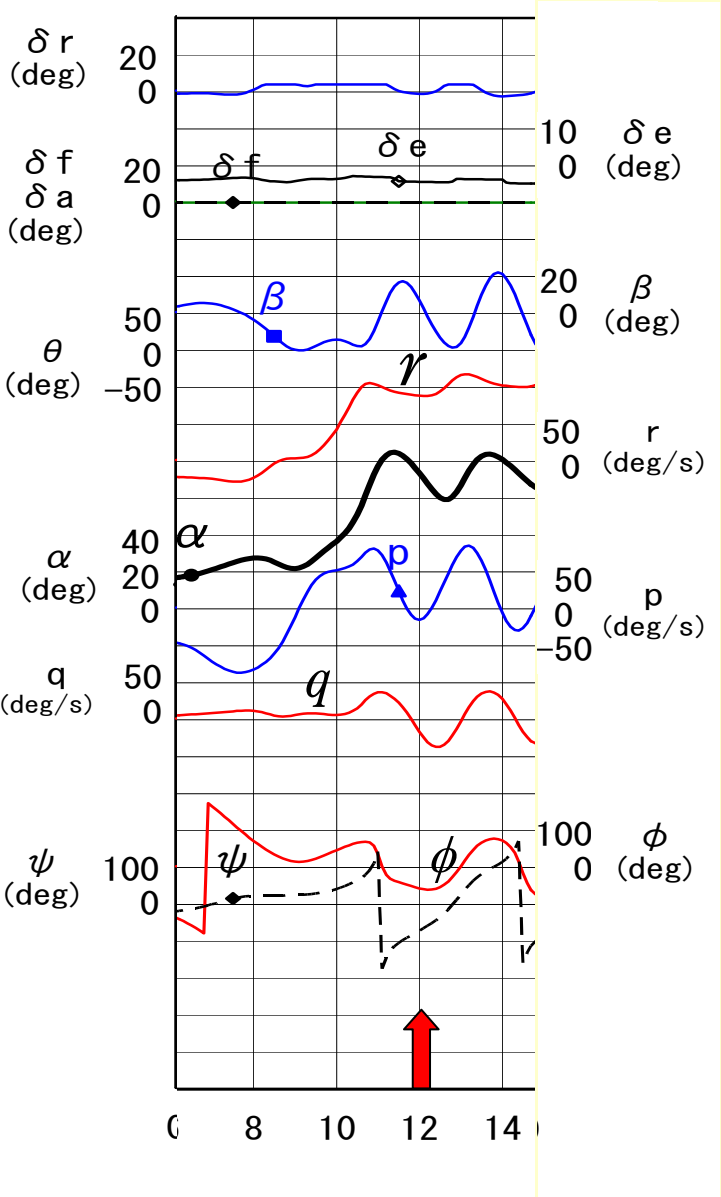


図4.1 スピン運動(図2.2)の前半部

$$\begin{aligned} \dot{\alpha} &= \boxed{q} - p \tan \beta \cos \alpha - \boxed{r \tan \beta \sin \alpha} \\ &+ \frac{57.3g \cos \alpha}{V \cos \beta} \cos \theta \cos \phi + \frac{57.3g \cos \alpha}{V \cos \beta} \cdot \frac{\rho V^2 S}{2W} C_z \\ &+ \frac{57.3g \sin \alpha}{V \cos \beta} \sin \theta - \frac{57.3g \sin \alpha}{V \cos \beta} \cdot \frac{\rho V^2 S}{2W} C_x \\ &= \boxed{-16.2} + 0.52 \boxed{-10.7} + 0.70 - 1.99 - 0.84 - 0.191 \\ &= -28.7 \text{ (deg/s)} \end{aligned}$$

α の変化率は q と r の影響大

$$\begin{aligned} \dot{\beta} &= \boxed{-r \cos \alpha} + \boxed{p \sin \alpha} \\ &+ \frac{57.3g}{V \cos \beta} \cos \theta \sin \phi + \frac{57.3g}{V \cos \beta} \cdot \frac{\rho V^2 S}{2W} C_y \\ &= \boxed{-25.0} \boxed{-14.2} - 3.7 - 0.42 \\ &= -43.3 \text{ (deg/s)} \end{aligned}$$

β の変化率は r と p の影響大

⑪ (t=12秒の状態を確認) (2/2)

$$\left\{ \begin{aligned}
 \frac{L}{57.3} &= \frac{-(I_z - I_y) \cdot qr}{57.3^2} + I_{xz} \frac{pq}{57.3^2} + \frac{\rho V^2 S b}{2} C_l \\
 &= \boxed{854} + 17.1 \boxed{-733} = 138 \\
 \frac{M}{57.3} &= \frac{(I_z - I_x) \cdot rp}{57.3^2} + I_{xz} \frac{r^2 - p^2}{57.3^2} + \frac{\rho V^2 S \bar{c}}{2} C_m \\
 &= \boxed{-2020} + 545 \boxed{-6510} = -7980 \\
 \frac{N}{57.3} &= \frac{-(I_y - I_x) \cdot pq}{57.3^2} - I_{xz} \frac{qr}{57.3^2} + \frac{\rho V^2 S b}{2} C_n \\
 &= \boxed{-226} + 102 \boxed{-519} = -643
 \end{aligned} \right. \quad (4.8)$$

$$\left\{ \begin{aligned}
 \dot{p} &\approx \frac{L}{I_x} + \frac{I_{xz}}{I_x} \cdot \frac{N}{I_z} \\
 &= \boxed{3.4} - 0.5 = 2.9 \text{ (deg/s)} \\
 \dot{q} &= \frac{M}{I_y} = -84 \text{ (deg/s)} \\
 \dot{r} &\approx \frac{N}{I_z} + \frac{I_{xz}}{I_z} \cdot \frac{L}{I_x} \\
 &= \boxed{-5.0} + 0.1 = -4.9 \text{ (deg/s)}
 \end{aligned} \right.$$

p, q, r の変化率は、
 それぞれ慣性連成項
 qr, rp, pq の影響、
 および空力係数
 C_l, C_m, C_n の影響大

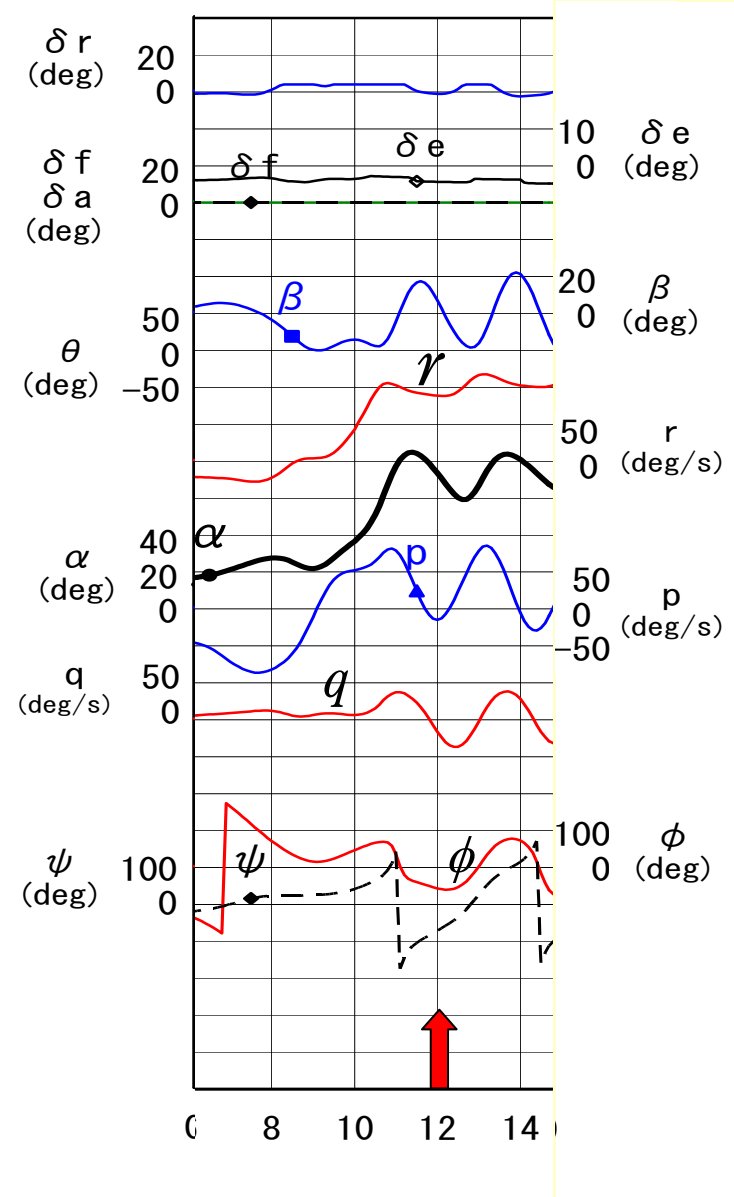


図4.1 スピン運動(図2.2)の前半部

⑫ (t=11秒と12秒の数値に基づく運動) (まとめ)

迎角およびヨー角速度は

$$\underline{\alpha > 70^\circ, \quad r \doteq 100 \text{ (deg/s)}}$$

このとき、 q が正あるいは β が負なら $\dot{\alpha}$ が正の傾向であるが、これを次のように表す。

- $[q +, \beta -] \Rightarrow [\dot{\alpha} +]$ (空力分は小)

以下同じ表現で次のようである。

- $[r -, p +] \Rightarrow [\dot{\beta} +]$ (空力分は小)

- $[qr -, C_l(\beta -)] \Rightarrow [\dot{p} +]$

- $[rp +, C_m +] \Rightarrow [\dot{q} +]$

- $[pq -, C_n(\beta -)] \Rightarrow [\dot{r} +]$

$$\dot{\alpha} \doteq q - p \tan \beta \cos \alpha - r \tan \beta \sin \alpha$$

$$\dot{\beta} \doteq -r \cos \alpha + p \sin \alpha$$

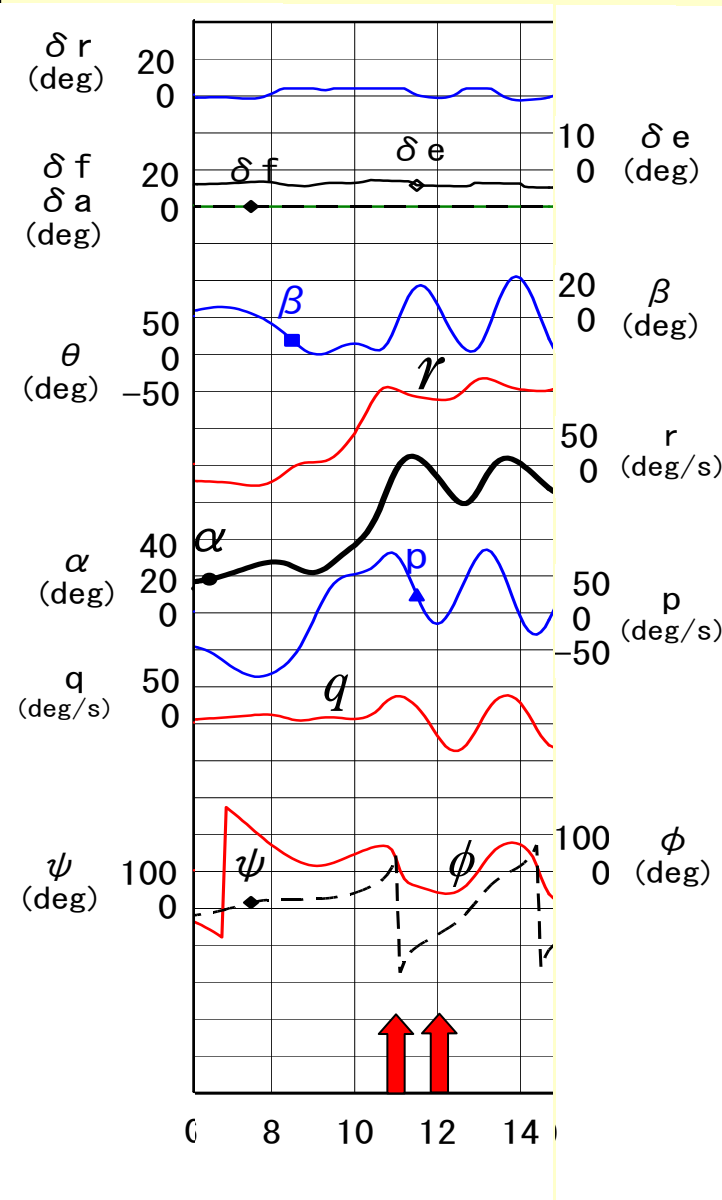


図4.1 スピン運動(図2.2)の前半部

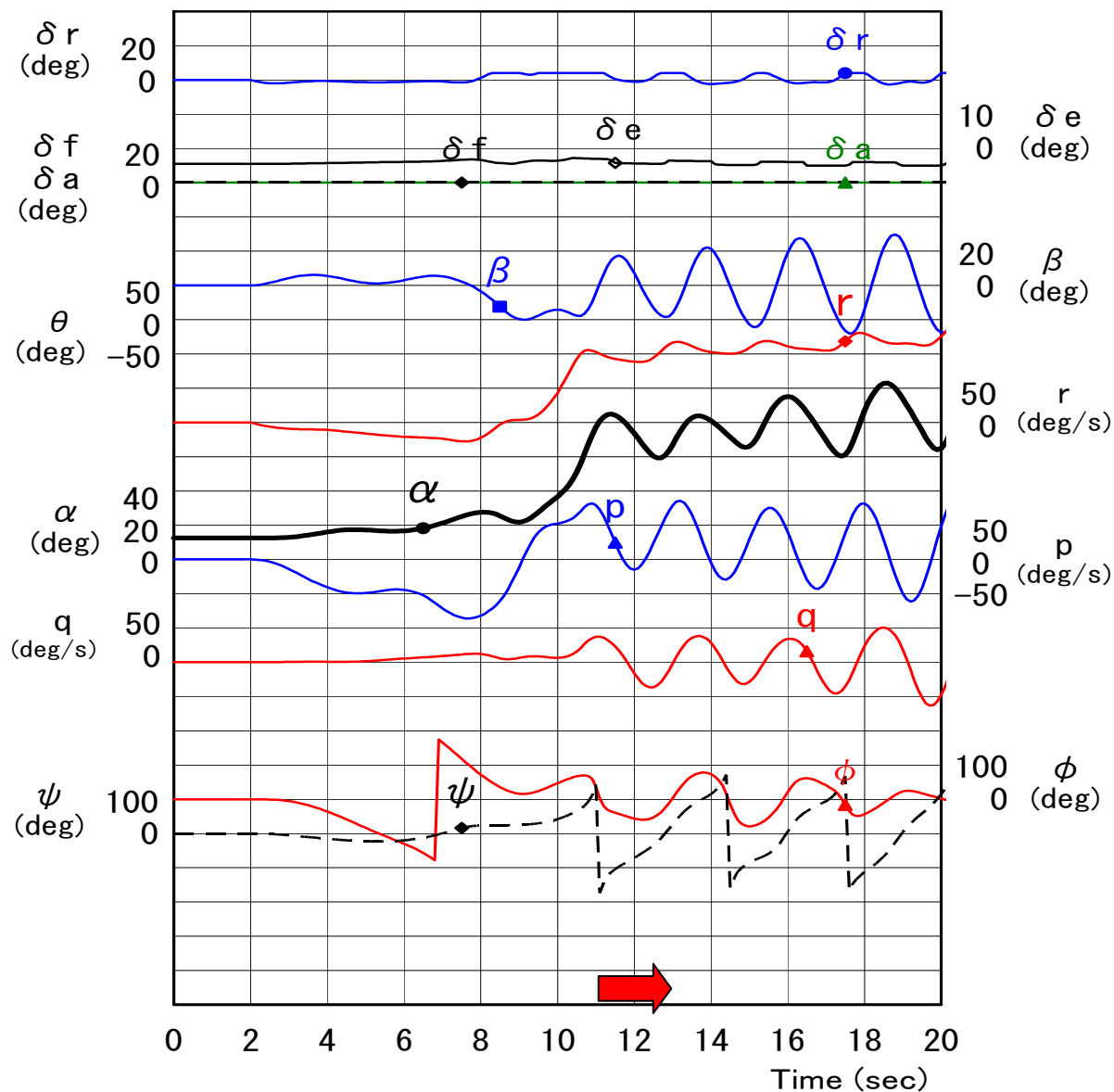


図4.1 スピン運動(図2.2)の前半部

⑬ (t=11秒～, ヨー角速度が100 (deg/s) 一定となる理由) :

通常迎角では, ヨー角速度が生じると, ヨーダンピングによって減衰し, 横滑り角も方向安定により減衰する.

t=11秒以降はヨーダンピングが0 ($\alpha > 65^\circ$) となり, 横滑り角に対して方向不安定 ($\alpha > 20^\circ$) となるため, ヨー運動も横滑り角も減衰しなくなる.

スピン運動からの回復は可能か

- エンジンアウト時のスピン運動に対して、操舵によって回復可能かどうか計算を実施した。
- しかし、スピン運動が発達してしまった後では操舵によって回復することはできなかった。
- それは、迎角が 60° を超えてしまうため、3舵がほとんど効かなくなるためである。
- 回復するにはスピンシュートなどの補助手段が必要になる。

スピン運動を回避する操舵(1/3)

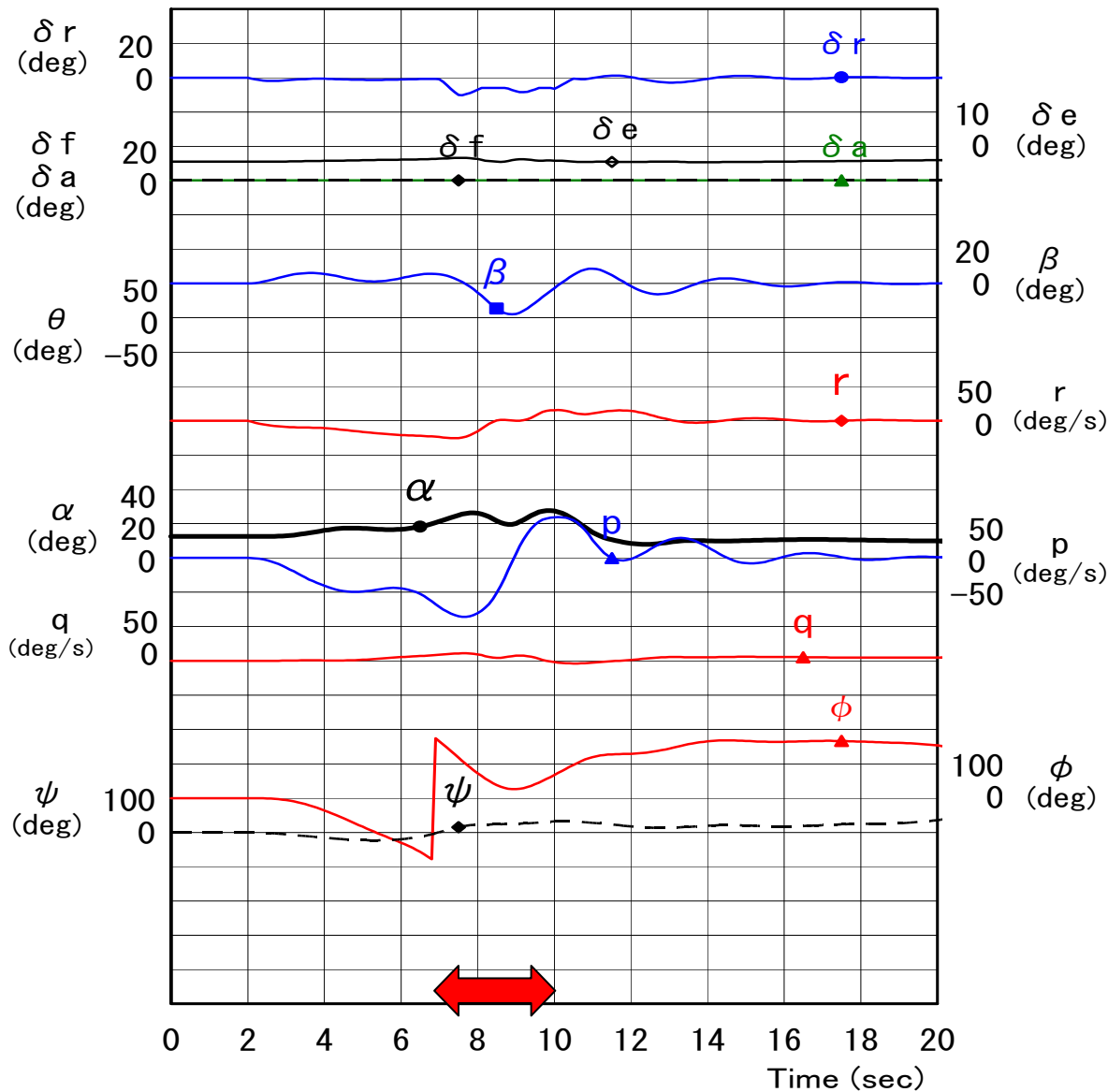
- スピン運動に発達してからは、操舵による回復は不可能であったが、スピン運動に入るのを回避する操舵について考える。
- エンジンアウト時にラダーの当て舵をしない場合はスピン運動に発展するので、エンジンアウト時にどのくらいの時間までにラダーの当て舵を開始すればよいかシミュレーション計算を実施した。結果を次に示す。

スピン運動を回避する操舵(2/)

表7.1 スピン運動回避操舵の結果

No.	左エンジン アウト	右エンジン 停止	ラダー 当て舵	スピン回避 成功(○)
(1)	t=2秒	t=10秒	t=6~10秒	○
(2)			t=7~10秒	○
(3)			t=8~10秒	×
(4)			なし	×

スピン運動を回避する操舵(3/3)



t=2秒 :
左エンジン
アウト

t=10秒 :
右エンジン
停止

図 7.1 スピン運動回避操舵(t=7~10 秒)

まとめ(1/5)

- 一般の旅客機では、パイロットの誤操作によって失速後のポストストールジャイレーションおよびスピン状態に陥るケースはあまりないと考えられる。
- しかし、機体の故障によって正常な飛行が妨げられた場合、パイロットの適切な操作が遅れることも考えられる。
- 本研究では、10人乗りの双発の旅客機がエンジンアウトに、ラダーの当て舵が遅れた場合に、スピン運動に発展する現象について検討した。

まとめ(2/)

- ここで用いた高迎角，大横滑り角の空力係数は一般的なデータを参考にして設定しており，**ここでの旅客機例がスピン運動に陥るということではない。**
- 本論文の目的は，**航空機がスピン運動に陥る過程や回避操舵の影響等**の物理的現象を把握することである。

まとめ(3/)

- **左エンジンアウト**の場合，数秒で**機首が左に振られながら**， 50 (deg/s) の**左ロール運動**により**バンク角は左 90° 程度**になる.
- このため，パイロットが**適切なラダーの当て舵が遅れることは予想されること**である.
- しかし，当て舵が遅れて，その結果十分に**発達したスピン運動**に対しては，迎角が 60° を超えてしまうため，**パイロット操舵による回復は困難**となる.

まとめ(4/)

- そこで、エンジンアウトからラダーの当て舵操舵までの許容を検討した結果、約5秒以内であればスピン運動に発展しないことが明らかになった。
- ただし、このとき機体の姿勢はほぼ背面状態になっていることに注意する必要がある。

まとめ(5/5)

- スピン運動を理解するには、空力係数を適切に模擬した非線形6自由度運動方程式によるシミュレーション計算が必要である.
- 本論文では、一般的なデータを参考にして設定した高迎角、大横滑り角の空力係数を用いて、スピン運動に発展していく運動現象とそれを回避する操舵について、10人乗りの旅客機を例としてシミュレーション計算により明らかにした.

参考文献

- 1) W. P. Gilbert, L. T. Nguyen, and R. W. Van Gunst: Simulator Study of the Effectiveness of an Automatic Control System Designed to Improve the High Angle-of-Attack Characteristics of a Fighter Airplane, NASA TN D-8176, May 1976.
- 2) 増田逸郎, 亀山忠史, 片柳亮二: 超音速高等練習機(T-2)のスピン試験; (その2)シミュレーション計算, 日本航空宇宙学会, 第15回飛行機シンポジウム, 1977年11月.
- 3) J. R. Chamber and S. B. Grafton: Aerodynamic Characteristics of Airplane at High Angles of Attack, NASA TM 74097, December 1977.
- 4) H. P. Stough III, dD. J. DeCarlo and M. Patton, Jr.: Spin Resistance Evaluation of a Light Airplane, SAE Technical Paper 871021, April 1987.
- 5) L. E. Ericsson: Prediction of High-Alpha Vehicle Dynamics, ICAS-90-3.5.1, 1990.
- 6) W. F. Phillips: Mechanics of Flight, John Wiley & Sons, 2004.
- 7) 片柳亮二: 航空機の飛行力学と制御, 森北出版, 2007.
- 8) 宮田昌宏, 山崎武志, 高野博行, 馬場順昭: 航空機の定常スピン領域の数値解析, 日本航空宇宙学会, 第48回飛行機シンポジウム, 2010年11月.
- 9) 片柳亮二: 航空機のスピン運動の発達と回避操舵について, 第55回飛行機シンポジウム, 2017年11月.

以上