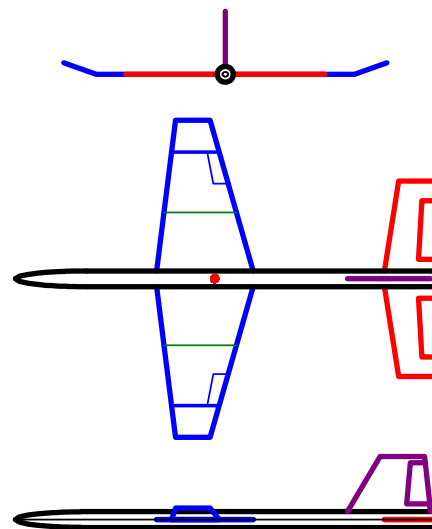


ペーパープレーンの飛行特性

片柳亮二

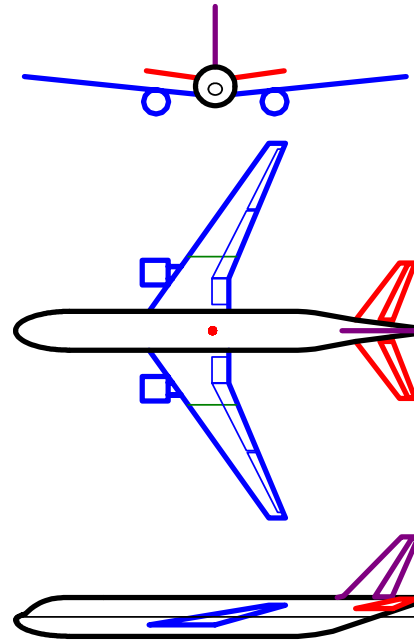
ペーパープレーンの例

機体重量	0.01 (kgf)
主翼面積	0.00688 (m ²)
翼面荷重	1.45 (kgf/m ²)
平均翼弦	0.0408 (m)
スパン	0.182 (m)
胴体長	0.236 (m)
水平尾翼面積	0.00284 (m ²)
主翼尾翼間距離	0.124 (m)
水平尾翼容積比	1.25



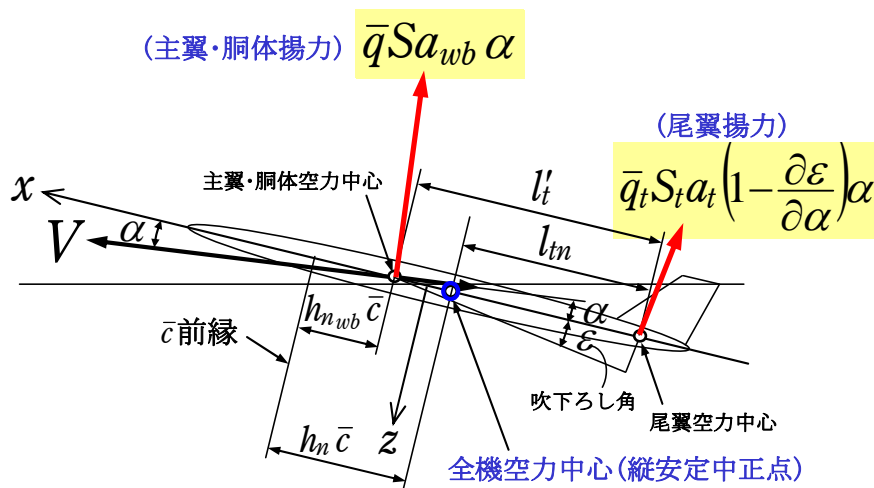
旅客機の大きさ等(参考)

機体重量	161 (tf)
主翼面積	428 (m ²)
翼面荷重	376 (kgf/m ²)
平均翼弦	7.95 (m)
スパン	60.9 (m)
胴体長	63.7 (m)
水平尾翼面積	100 (m ²)
主翼尾翼間距離	28.1 (m)
水平尾翼容積比	0.826



空力中心について(1/4)

(重要な役目をする空力中心を確認しておく)

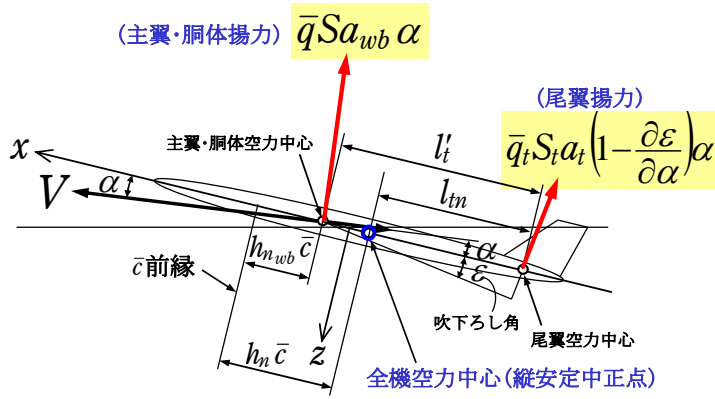


$$\bar{q} S a_{wb} \alpha (h_n - h_{nwb}) \bar{c} = \bar{q}_t S_t a_t \left(1 - \frac{\partial \varepsilon}{\partial \alpha}\right) \alpha l_{tn}$$

(主翼・胴体揚力のモーメント)

(尾翼揚力のモーメント)

空力中心について (2/)



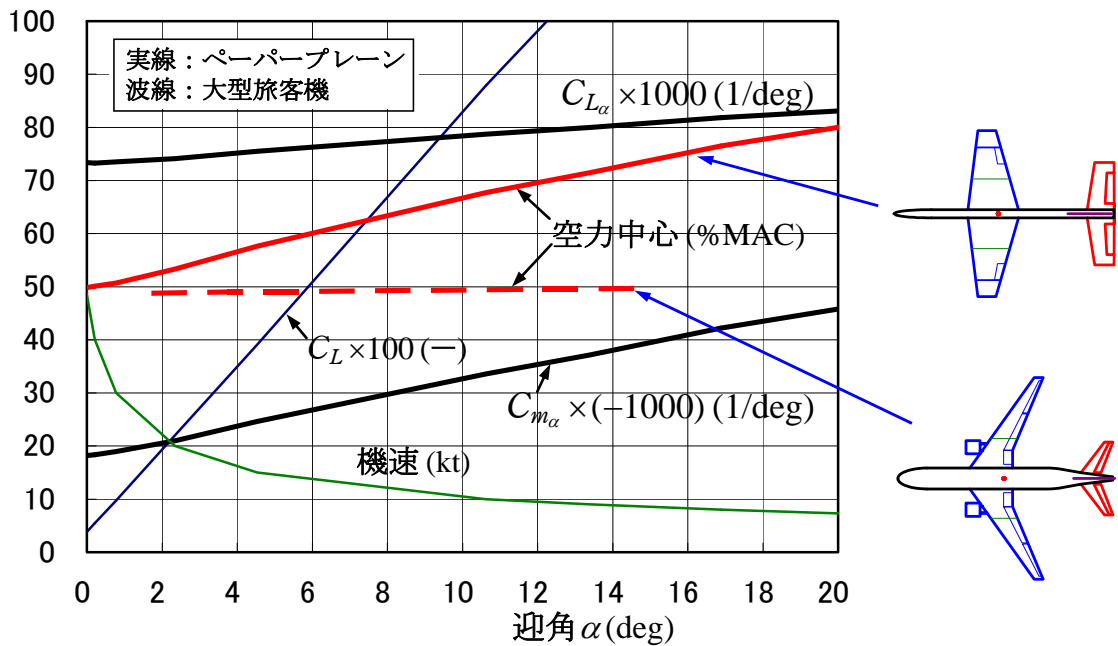
$$h_n = h_{n_{wb}} + \eta_t V'_H \frac{a_t}{C_{L\alpha}} \left(1 - \frac{\partial \epsilon}{\partial \alpha} \right)$$

全機空力中心
 $\eta_t = \frac{\bar{q}_t}{\bar{q}}$
 $V'_H = \frac{S_t l'_t}{S \bar{c}}$
尾翼揚力傾斜

主翼胴体空力中心
吹き下ろしの影響

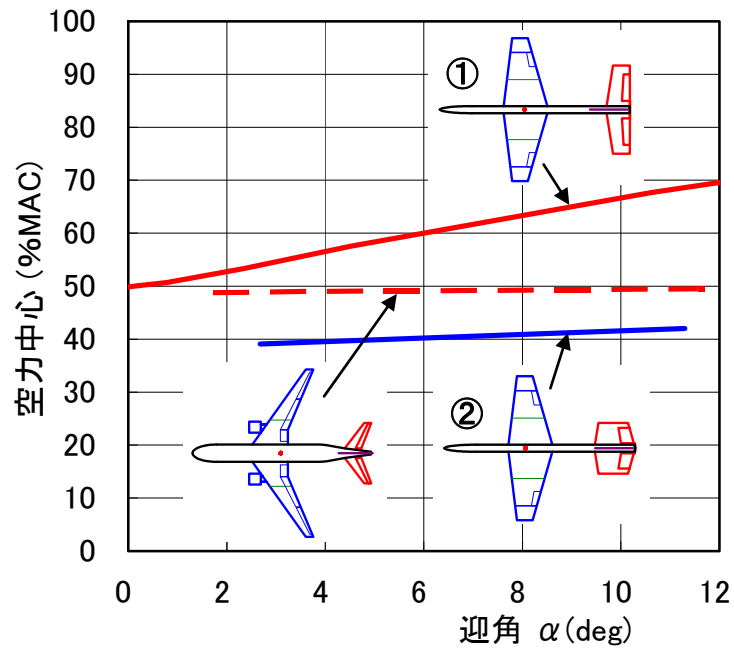
空力中心について (3/)

ペーパープレーンと旅客機の空力中心の比較 (1)



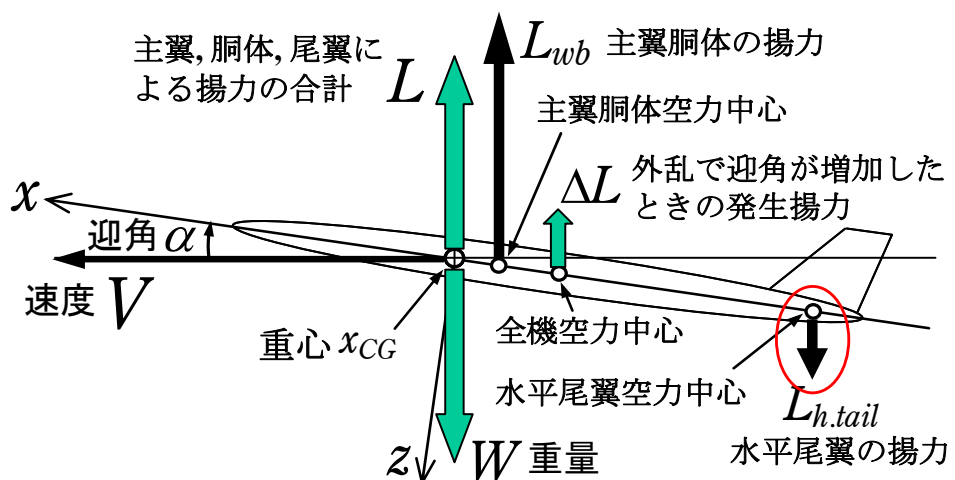
空力中心について (4/4)

ペーパープレーンと旅客機の空力中心の比較 (2)



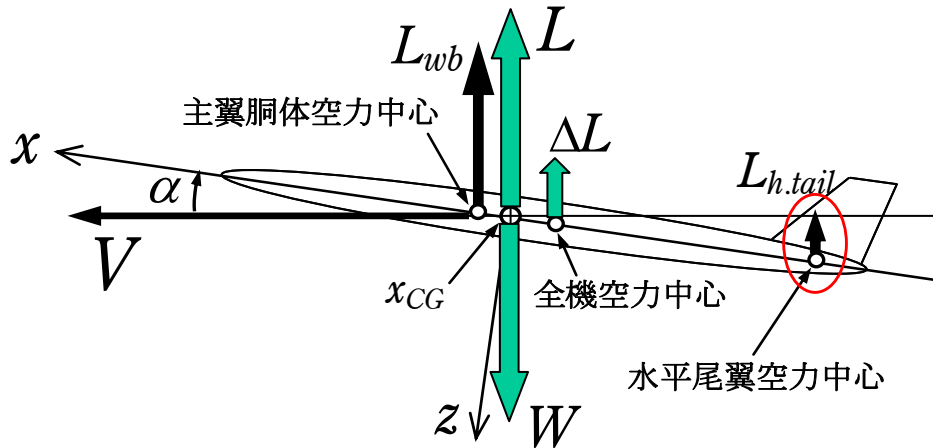
釣り合いについて (1/2)

(1) 重心が主翼胴体空力中心よりも前方



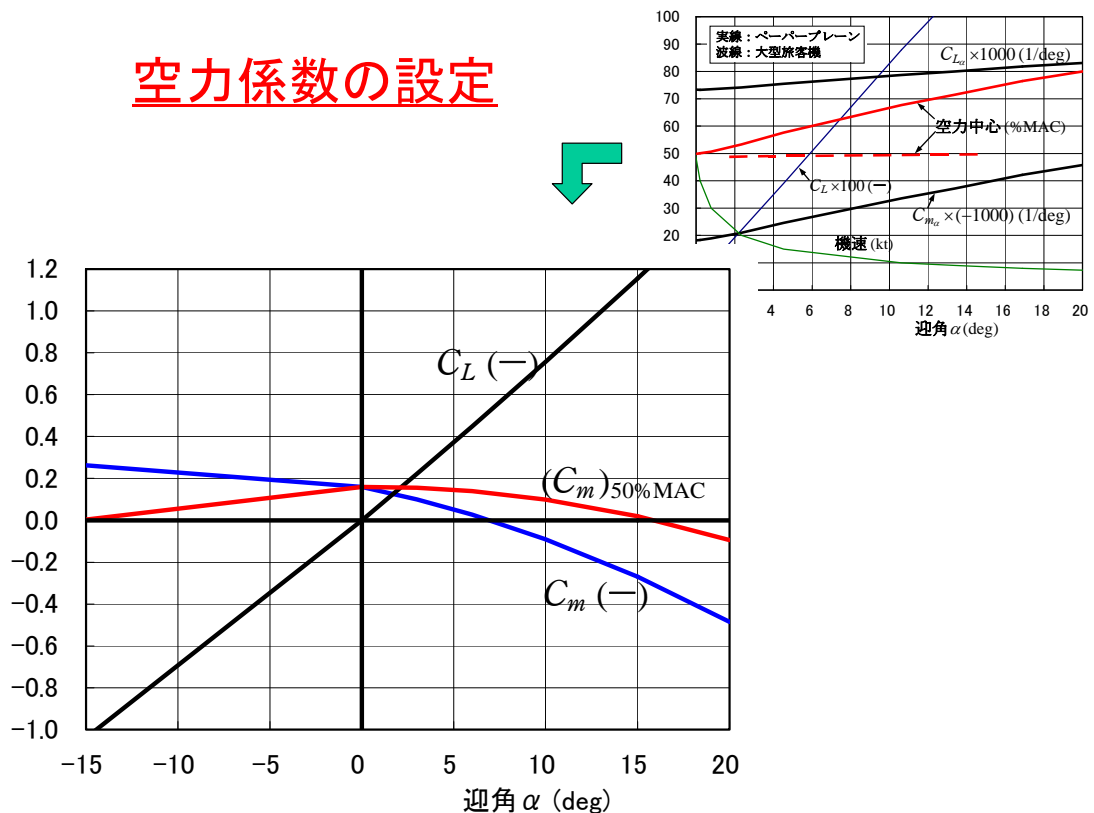
釣り合いについて (2/2)

(2) 重心が主翼胴体空力中心よりも後方

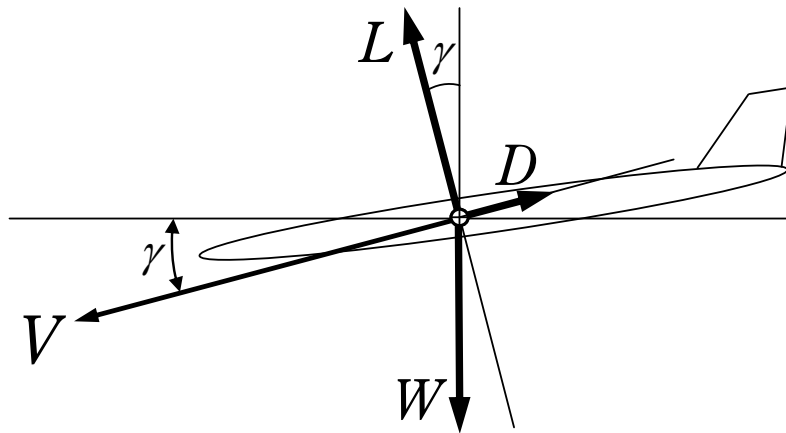


〔ペーパープレーンは主翼面積の増加を抑えるため、
重心を後退させて尾翼の揚力を積極的に利用〕

空力係数の設定

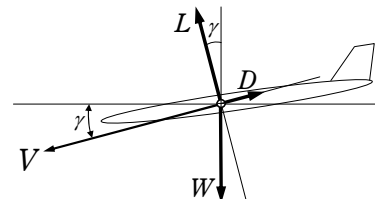


定常滑空飛行 (1/2)



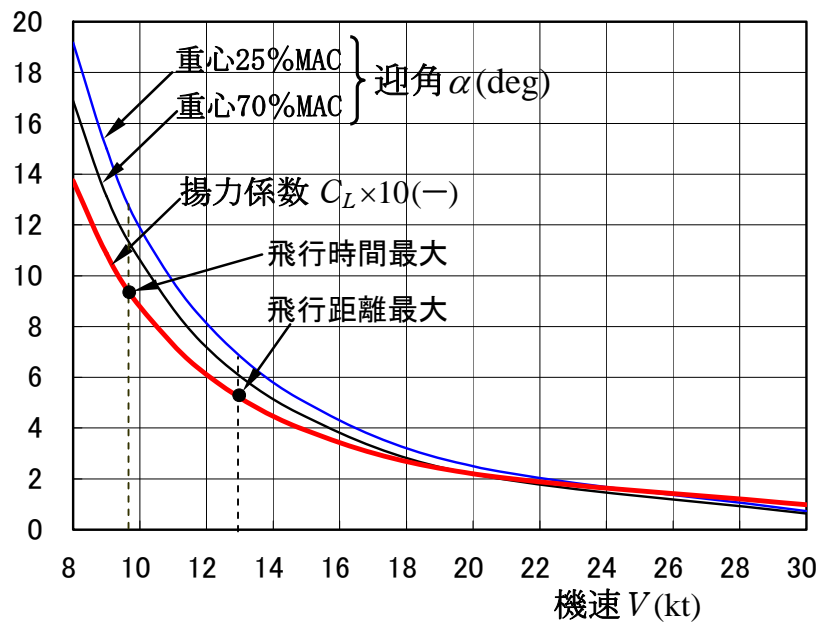
{ 飛行距離最大 \longrightarrow $(C_L)_R = \sqrt{\frac{C_{D_0}}{k}}$
 { 飛行時間最大 \longrightarrow $(C_L)_t = \sqrt{\frac{3C_{D_0}}{k}}$ (低速)

定常滑空飛行 (2/2)



最適条件	飛行距離最大	飛行時間最大
C_{D_0}	0.034	
k	0.124	
C_L	$\sqrt{\frac{C_{D_0}}{k}} = 0.524$	$\sqrt{\frac{3C_{D_0}}{k}} = 0.907$
V	13 (kt)	9.5 (kt)
$\gamma \doteq \frac{C_D}{C_L}$	$\frac{2C_{D_0}}{C_L} = 7.4^\circ$	$\frac{4C_{D_0}}{C_L} = 8.6^\circ$

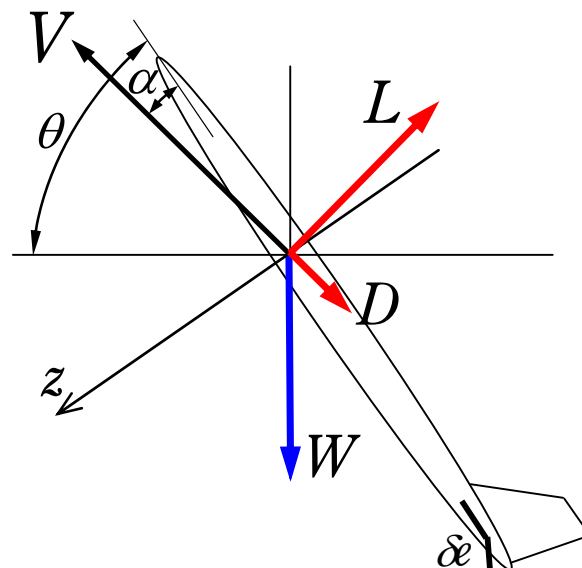
機速と揚力係数および迎角との関係



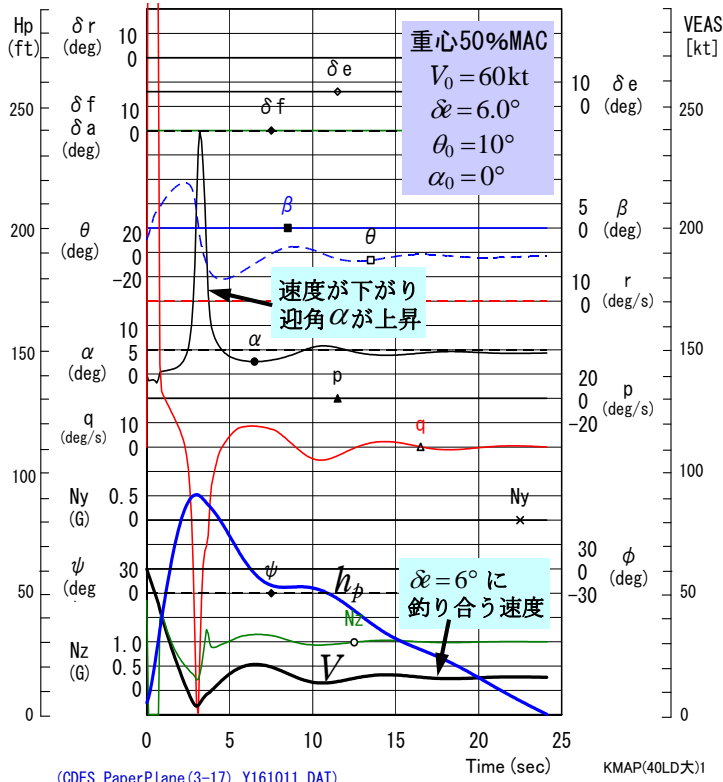
〔重心が後退すると尾翼の釣り合い揚力が増加することから、迎角は減少する〕

ペーパープレーンの飛行解析(1/12)

シミュレーションの初期状態



ペーパープレーンの飛行解析(2/)



計算例1

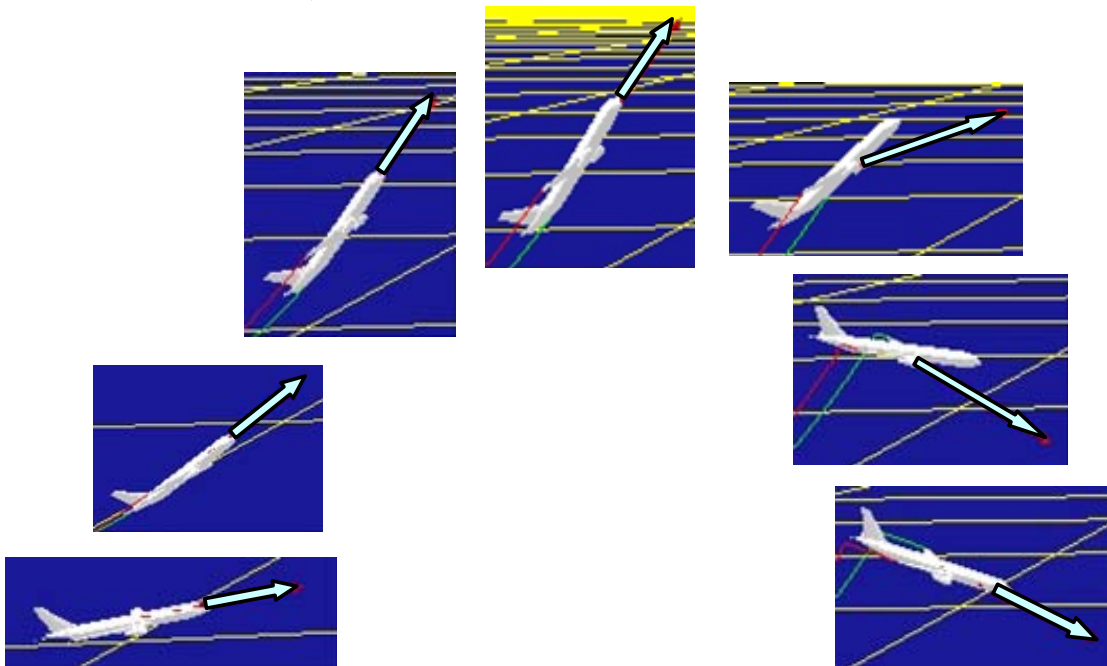
初速60ktに対しては引き舵状態である。そのため、機体は初期ピッチ角10degから急激に約60degまでピッチアップする。

この際に急激に減速して迎角が急上昇するが、同時にピッチダウンして滑空状態に入る。

滑空状態が安定すると機速はエレベータ舵角6degに釣り合う15ktになる。

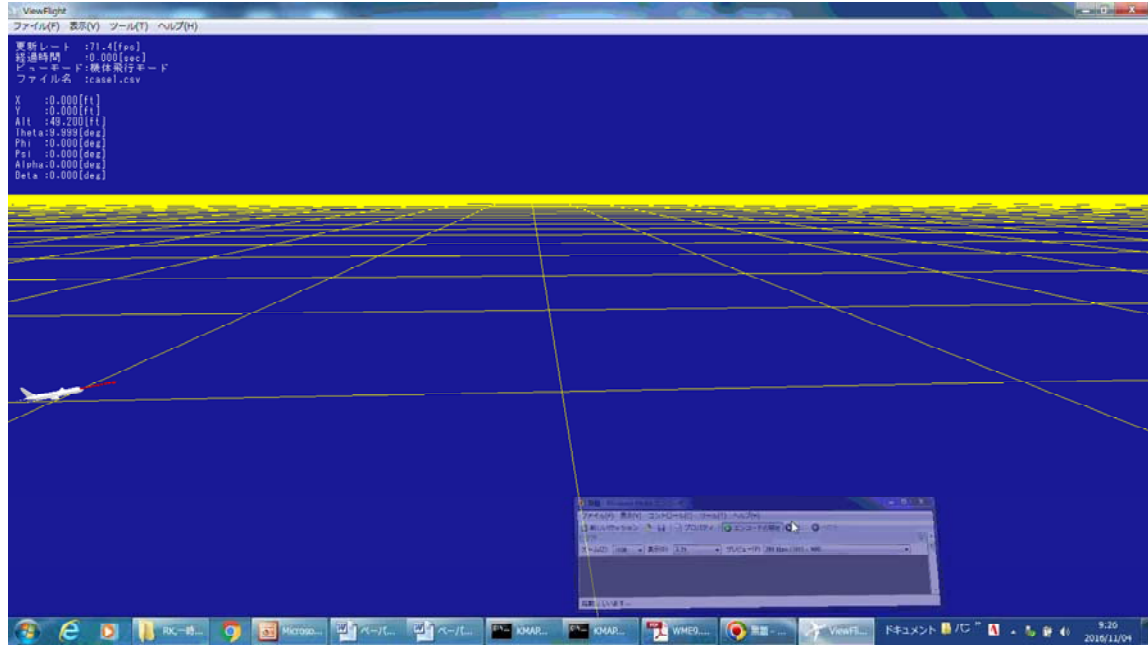
ペーパープレーンの飛行解析(3/)

計算例1のアニメーション



ペーパープレーンの飛行解析 (3-1/)

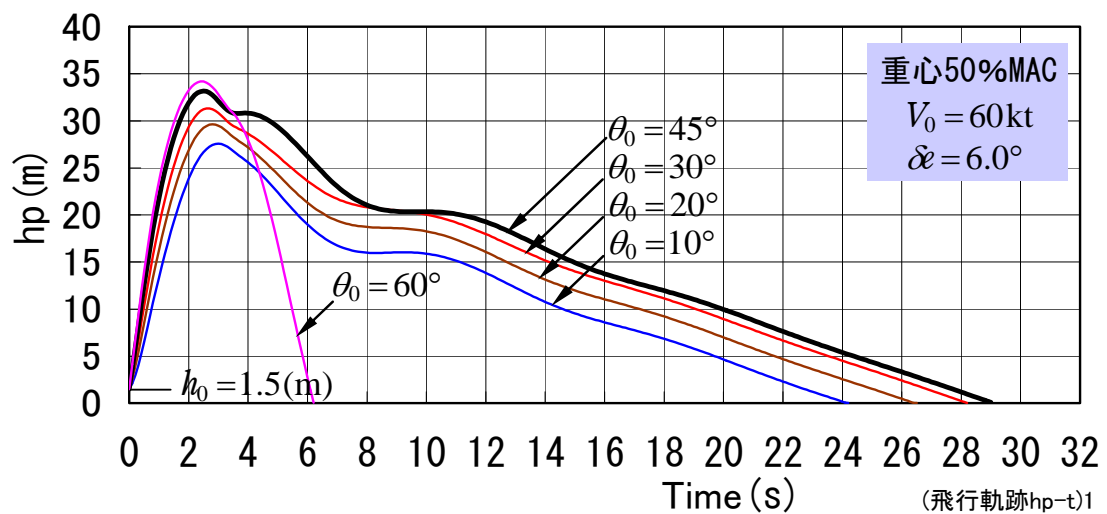
計算例1のアニメーション



(ODES. PaperPlane (3-17). Y161011. DAT)

ペーパープレーンの飛行解析 (4/)

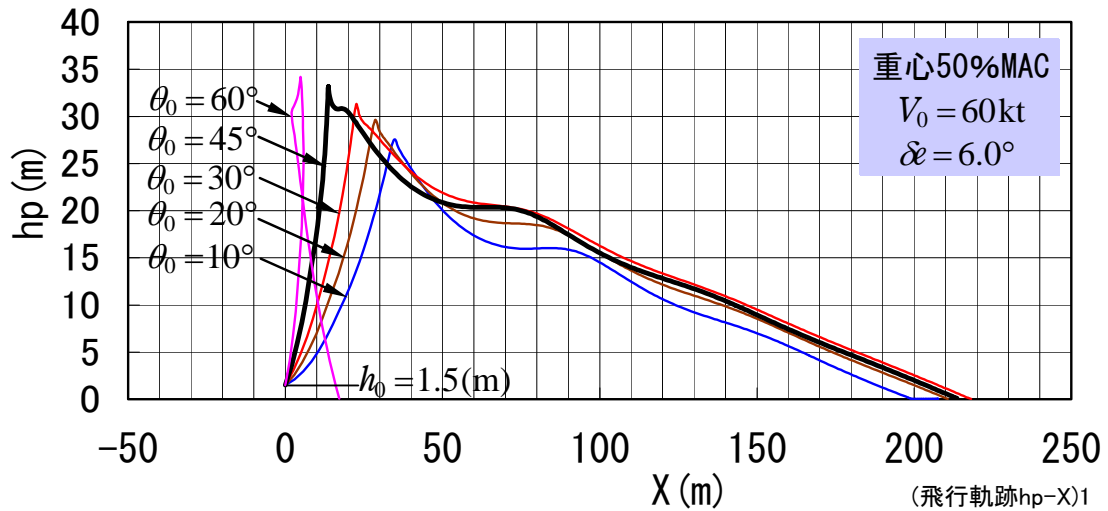
初期ピッチ角の変化 (高度～時間)



(ODES. PaperPlane (3-17). Y161011. DAT) (3-18) (3-19) (3-20) (3-20-1)

ペーパープレーンの飛行解析(5/)

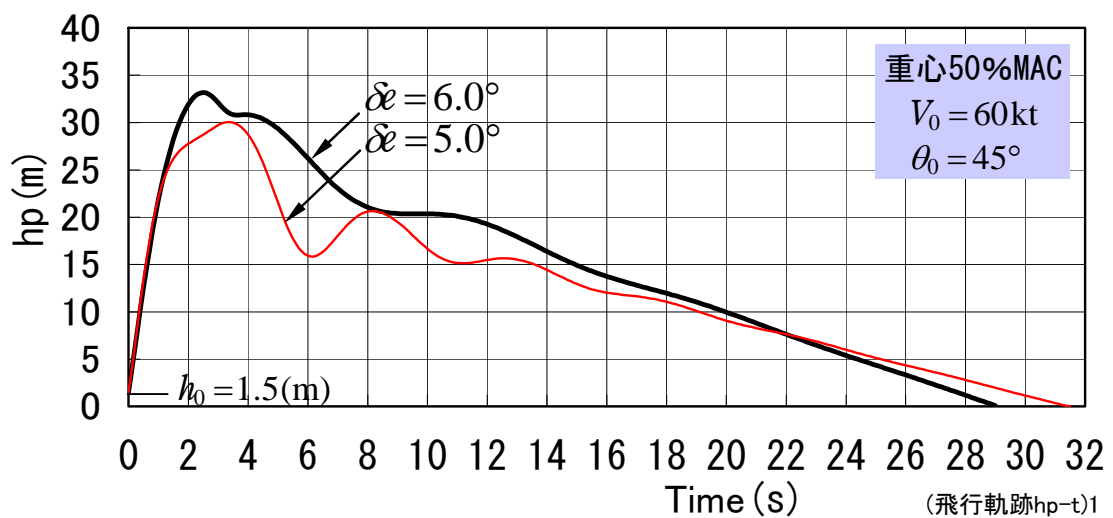
初期ピッチ角の変化(高度～水平距離)



(CDES. PaperPlane (3-17). Y161011. DAT) (3-18) (3-19) (3-20) (3-20-1)

ペーパープレーンの飛行解析(6/)

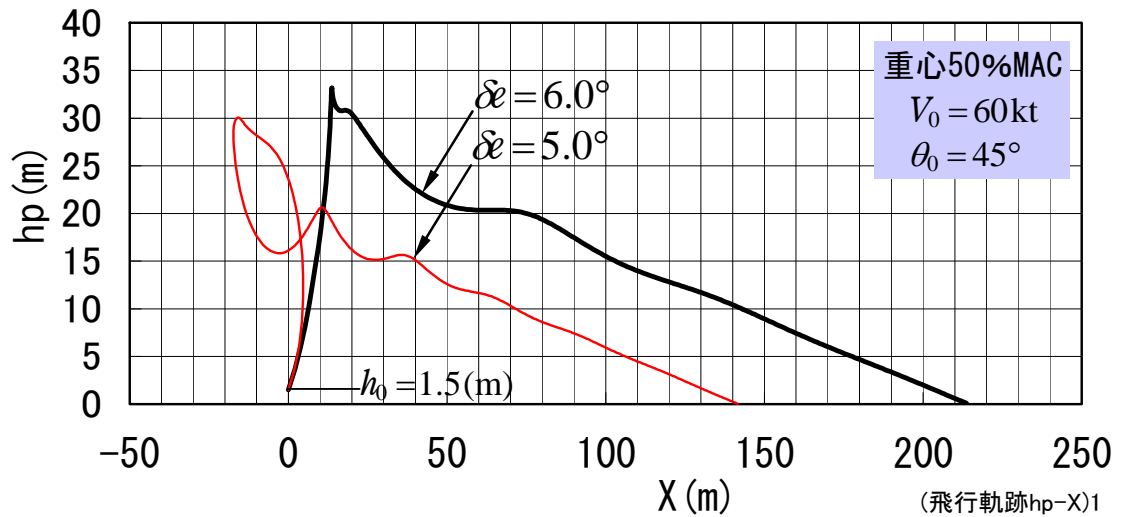
エレベータ舵角の影響(高度～時間)



(CDES. PaperPlane (3-20). Y161011. DAT) (3-21)

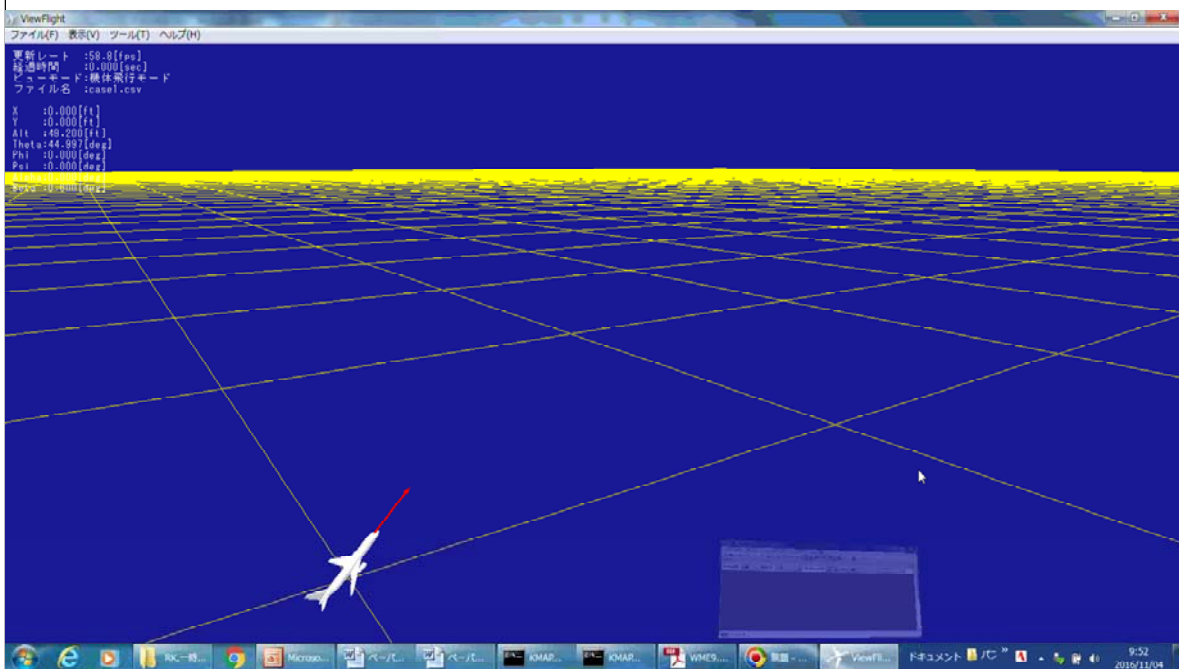
ペーパープレーンの飛行解析(7/)

エレベータ舵角の影響(高度～水平距離)



(ODES, PaperPlane (3-20). Y161011. DAT) (3-21)

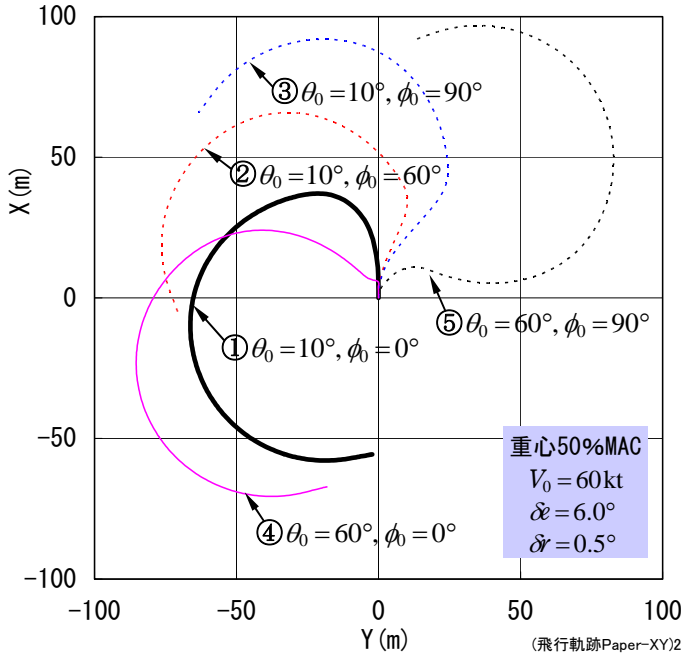
ペーパープレーンの飛行解析(7-1/) アニメーション



(ペーパープレーン3-21 (θ45, φ0, δe5). Y161104. wmv)

ペーパープレーンの飛行解析 (8/)

ラダー舵角と初期バンク角の影響 (X-Y)



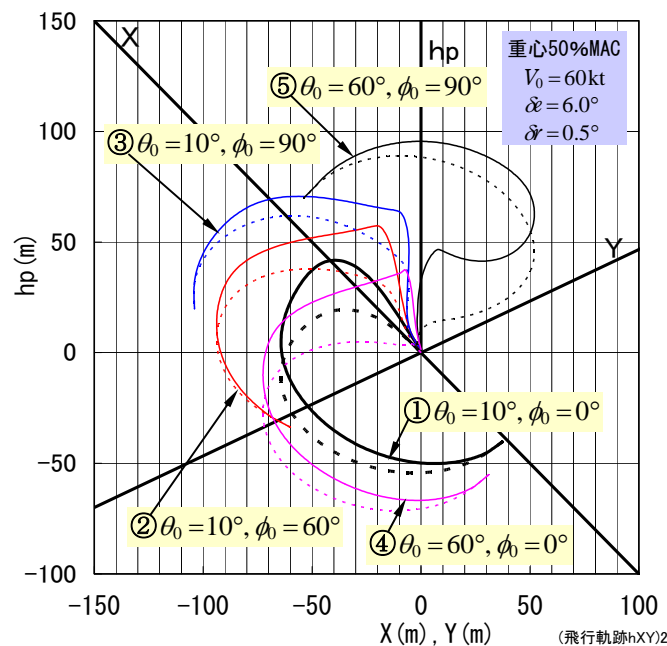
ラダー舵角により旋回させると、ピッチ角が大きくなり過ぎるのを防ぐことができる。

ただし、ラダー舵角は大きすぎると、安定した滑空に入る前にピッチ角が下がり急激に高度を失ってしまうので注意が必要である。

(CDES. PaperPlane (5-2). Y161015. DAT) (5-3) (5-4) (5-8) (5-5)

ペーパープレーンの飛行解析 (9/)

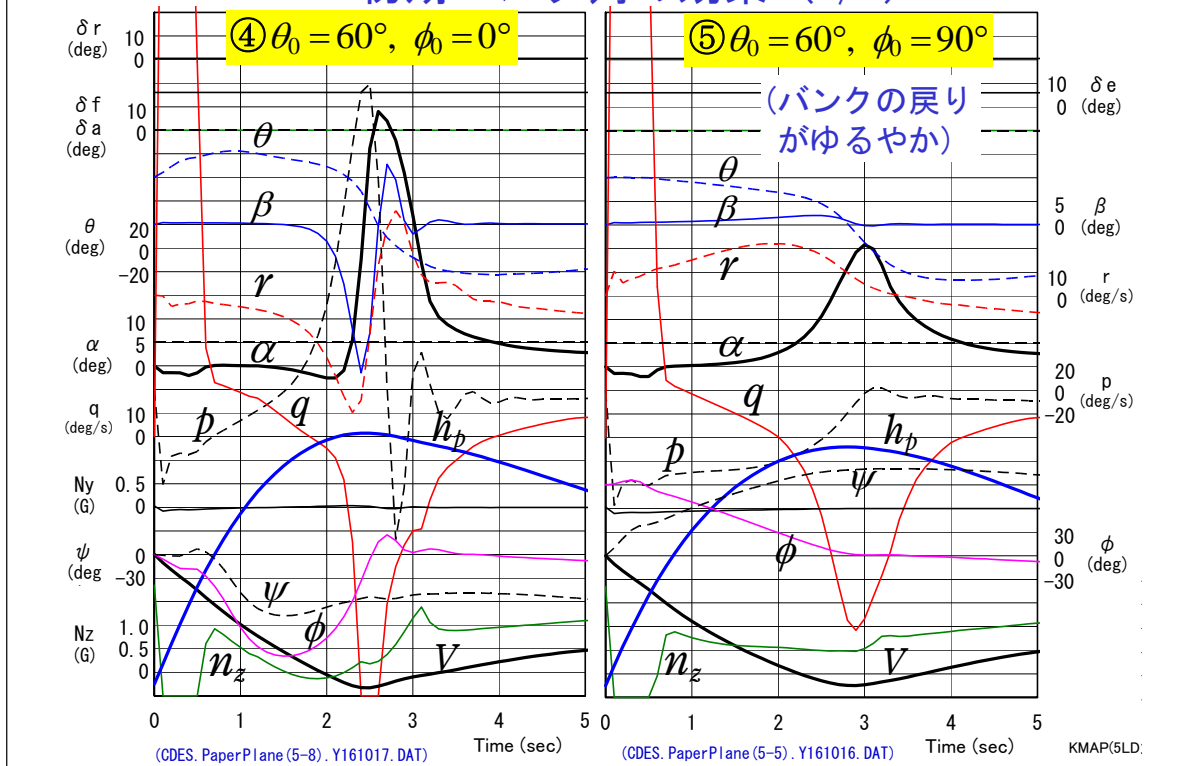
ラダー舵角と初期バンク角の影響 (X-Y-hp)



(CDES. PaperPlane (5-2). Y161015. DAT) (5-3) (5-4) (5-8) (5-5)

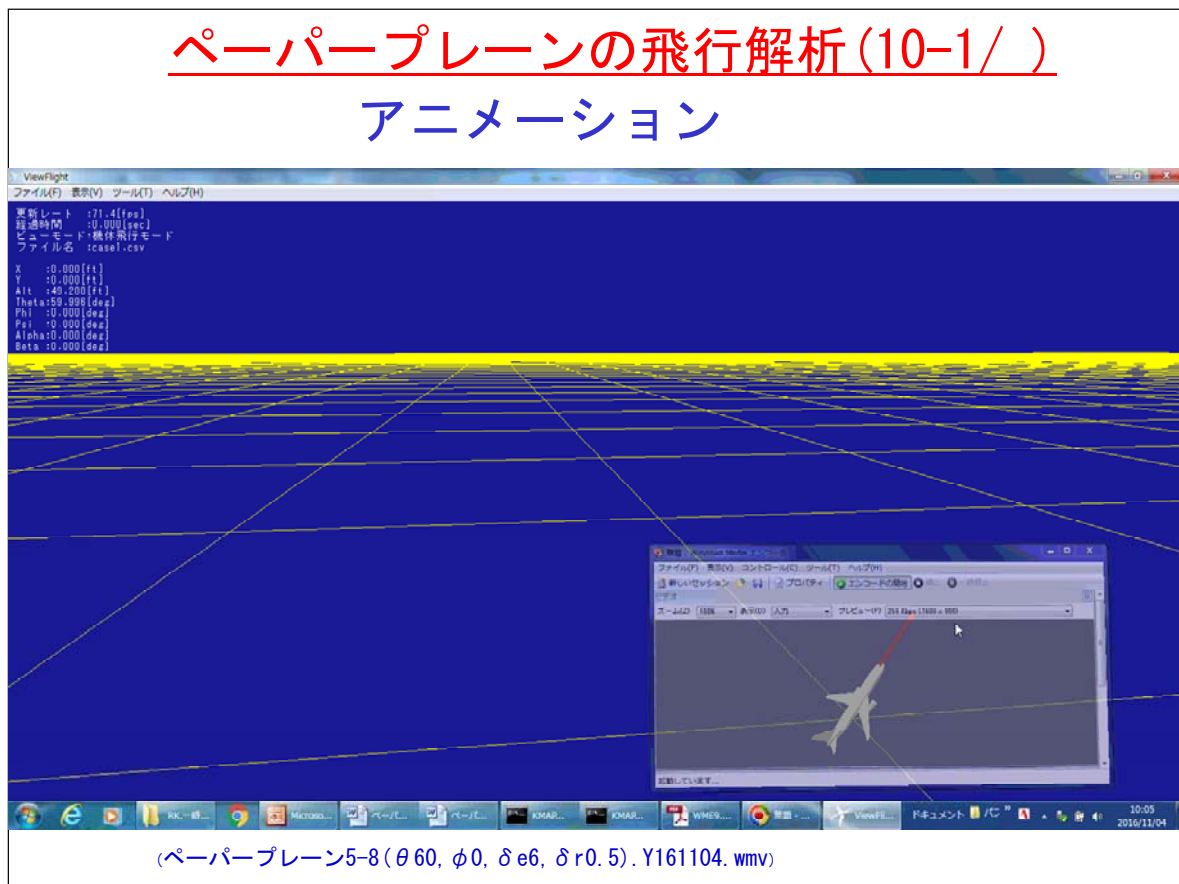
ペーパープレーンの飛行解析 (10/)

初期バンク角の効果 (1/2)

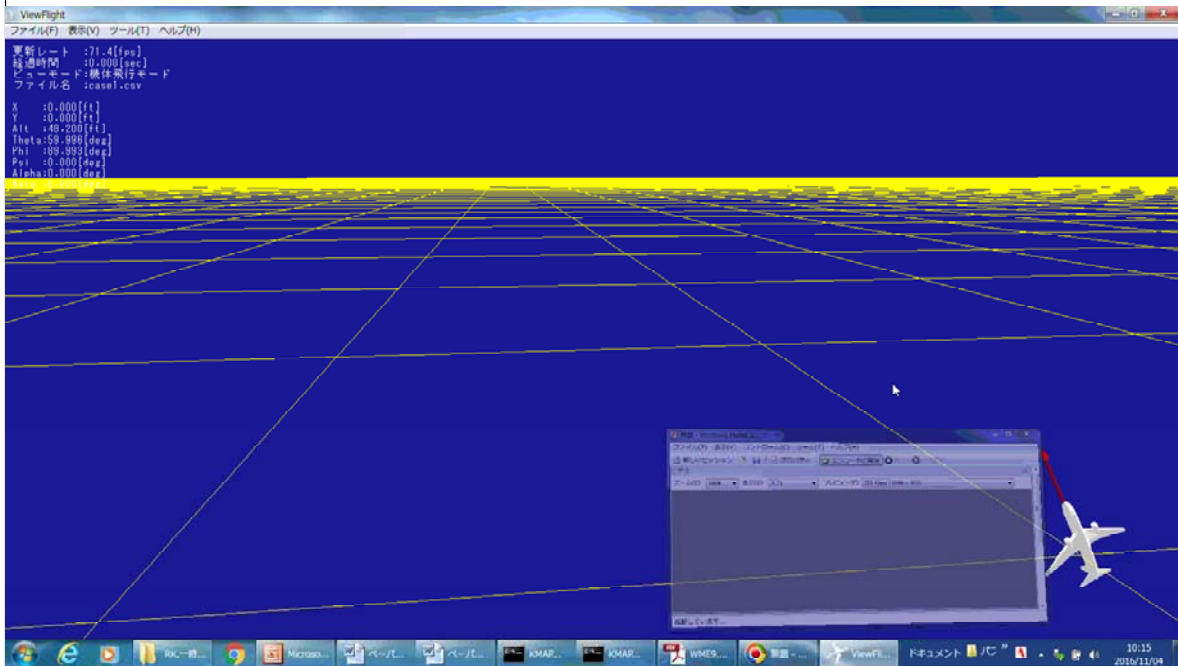


ペーパープレーンの飛行解析 (10-1/)

アニメーション

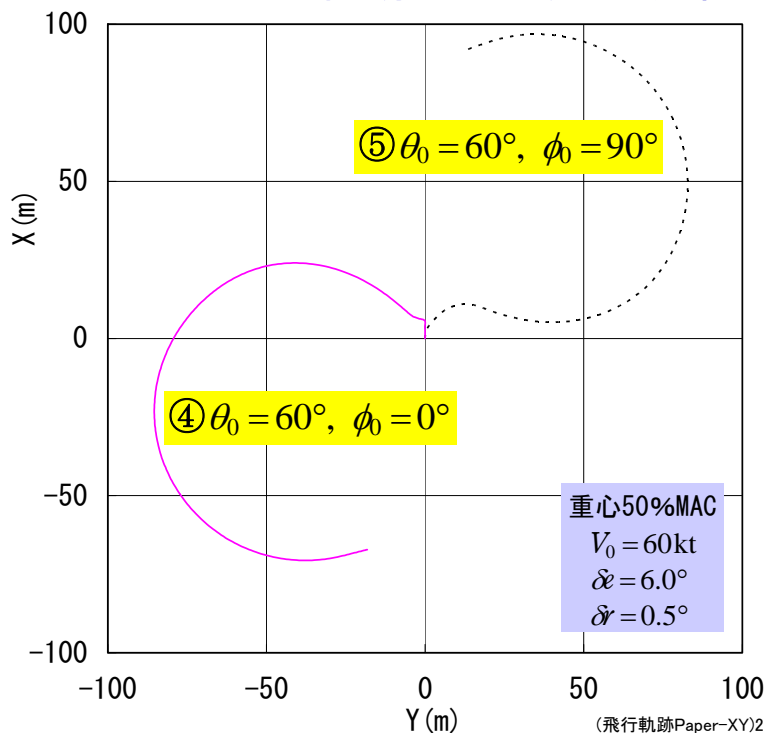


ペーパープレーンの飛行解析(10-2/) アニメーション



(ペーパープレーン5-5 ($\theta_0 = 60^\circ, \phi_0 = 90^\circ, \delta e_6, \delta r_0.5$). Y161104. wmv)

ペーパープレーンの飛行解析(11/) 初期バンク角の効果 (2/2)

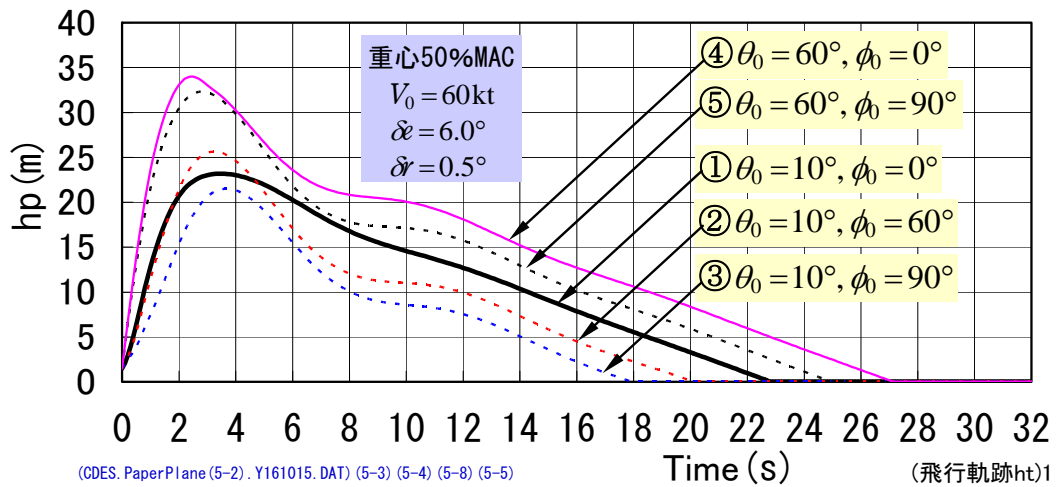


初期バンクをとると、バンクが0への戻りがゆるやかになる。

初期バンクが0だと、バンクが0から負の大きなバンクに発展して、横滑り角が生じて激しいピッチ運動となる。

ペーパープレートの飛行解析(12/12)

ラダー舵角と初期バンク角の影響(滞空時間)



初期ピッチ角を大きくすると、到達高度を高くすることができる。
 (ラダー舵角を使って旋回させないと後ろに回転するので注意が必要)

初期バンク角をとると、高度獲得後の滑空の初期に機速が下がり、
 迎角が一時的に増大することから頭下げが強くなる。その結果、
 高度が急に下がる部分を生じて滞空時間が短くなる。

まとめ(1/5)

(滞空時間を長くするには)

- ・ 初速を高くして高度を確保する
- ・ 初期ピッチ角を大きくすると、到達高度高くすることができる
- ・ その後の滑空飛行においては、飛行時間最大となる条件、 $C_D/C_L^{3/2}$ を最大にする揚力係数に極力近づける

まとめ(2/)

(滞空時間を長くするには)

- ・ この最適滑空条件は比較的低速であるので、エレベータ舵角を低速条件に設定すると、初期の上昇時に引き過ぎとなり後方回転してしまう
- ・ 従って、エレベータ舵角を初速、初期ピッチ角とのバランスを注意して設定することが重要である

まとめ(3/)

(滞空時間を長くするには)

- ・ 上昇時に後方回転するのを防ぐには、ラダー舵角により旋回させると、ピッチ角が大きくなり過ぎるのを防ぐことができる
- ・ ただし、ラダー舵角は大き過ぎると、安定した滑空に入る前にピッチ角が下がり急激に高度を失ってしまうので注意が必要である

まとめ(4/)

(滞空時間を長くするには)

- ・ **ラダー舵角**を用いて旋回させる際に、**初期バンク角**を与えて発進させることもできる
バンク角90°においても安定した滑空状態を得ることが可能である
- ・ **初期バンク角**をとると、高度獲得後の滑空の初期に機速が下がり、迎角が一時的に増大することから頭下げが強くなる
- ・ その結果、高度が急に下がる部分を生じて**滞空時間が短くなる**

まとめ(5/5)

(滞空時間を長くするには)

いずれにしても、ペーパープレーンの滞空時間を長くするには、

- ・ 空力中心と重心位置、
- ・ 発進機速、
- ・ エレベータ舵角、
- ・ ラダー舵角、
- ・ 初期ピッチ角
- ・ 初期バンク角

を適切に設定することが必要である

(参考)

上記の計算は運動解析プログラムKMAP (ケマップ)によって実施しました.
KMAP (ケマップ)については, 下記ホームページ

<http://r-katayanagi.air-nifty.com/>

に説明がありますのでご覧ください.

その他, 飛行機の運動については下記を参考にしてください.

- 1) 片柳亮二:「航空機の飛行力学と制御」, 森北出版, 2007.
- 2) 片柳亮二: KMAPによる飛行機設計演習, 産業図書, 2009.
- 3) 片柳亮二: 例題で学ぶ航空工学, 成山堂書店, 2014.
- 4) 片柳亮二: 設計法を学ぶ 飛行機の安定性と操縦性, 成山堂書店, 2015.
- 5) 片柳亮二: ペーパープレーンのシミュレーションによる飛行特性解析,
日本航空宇宙学会第48期年会講演会, 2017年4月13日.

以上