

# CHick-2000 Project

## 剛性の影響を考慮した人力飛行機 における安定性に関する考察

CHick-2000 プロジェクトチーム “アクティブギャルズ”

坂本 慎介 (三菱電機(株)) 吉川 俊明 ((株)浅沼組)  
堀 琴乃 (東陶機器(株))

### 背景

1. 人力飛行機 CHick-2000 の開発・設計・製作に取り組み、直線飛行に成功したが、直線飛行に成功するまでにはPIO(Pilot Induced Oscillation)に陥ることにより数回の着地失敗に直面した。

2. PIO: 機体の運動あるいは振動をパイロットが修正しようと操舵したとき、その操舵が逆に運動をますます増大させるように作用することがある現象

3. 著者らは人力飛行機の安定性に関して検討を行い、PIOに陥った原因と対策について考察を既に行ったが、その検討では人力飛行機特有の柔軟性、すなわち剛性の影響を考慮しておらず、PIOに陥った原因は剛性に起因する可能性があった。



人力飛行機は軽量化に伴って必然的に柔軟となり、この剛性の影響はPIOの基礎となる安定性、動特性を考えるにあたって無視することができない場合がある。本論文では剛性を考慮した人力飛行機のPIOを含む安定性について考察を行った。

*Active Gals*

# CHick-2000 Project

## 柔軟な飛行機の安定性

人力飛行機の機体は軽量、低剛性、高アスペクト比および低翼面荷重等の特徴を有する。

通常の飛行機と比較して飛行速度、空気の見かけの質量、構造変形および Reduced Frequency 等が異なり、これらが柔軟な飛行機特有の安定性に影響を与えている。

人力飛行機の典型的な柔軟な箇所は主翼とテールームである。

主翼での定常飛行中の先端のたわみはリフトアップの外側での主翼の曲げによる影響によるものであり、横・方向の運動の応答に時間遅れを与える。

主翼のロリング、ヨーイング回りの慣性モーメントおよびその空気の見かけの質量による慣性モーメントが横・方向の運動に影響を与えている。

空気の見かけの質量を含む人力飛行機 CHick-2000 の機体の諸元を表 1 に示す。x 軸回り(ロリング)の慣性モーメントが空気の見かけの質量による寄与によって 2 倍程度になっている。

表 1 人力飛行機 CHick-2000 の機体の諸元

翼幅(m)	26.3	機体重量(kg)	73.0
全長(m)	7.1	アスペクト比	43.2

慣性モーメント	機体分のみ	空気の見かけの質量分	全機
$I_{xx}$ (kg·m <sup>2</sup> )	1565.0	1251.7	2816.7
$I_{yy}$ (kg·m <sup>2</sup> )	43.8	68.5	112.3
$I_{zz}$ (kg·m <sup>2</sup> )	1601.9	60.2	1662.1

*Active Gals*

# CHick-2000 Project

## Reduced Frequency

Reduced Frequency：揚力係数の時間遷移において非定常空気の寄与の定常近似に対する差異の影響を表す。

翼弦長を基準とした場合、人力飛行機にて重要になる縦の長周期モードに対して以下のようなになる。

$$k = c / U_0 \\ = 0.29 \times 0.636 / 7.5 = 0.0246$$

：縦の長周期モードの周波数  
c：空力平均翼弦  
U<sub>0</sub>：定常速度

通常の航空機ではk = 0.01 ~ 0.05 であり、定常近似で評価を行っても問題ないレベルと考える。

従ってシミュレーション解析では非定常空気の影響は空気の見かけの質量のみを考慮している。

*Active Gals*

# CHick-2000 Project

## 機体構造とペダル漕ぎとの共振

### 機体構造の固有モード

主翼の曲げ・ねじりの固有振動数：0.5～1.5Hz 程度

テールブームの曲げの固有振動数：2Hz 程度

### ペダル漕ぎによる励振

人力飛行機のパイロットはエンジンであると共に制御装置である。

人力飛行機 CHick-2000 ではパイロットはペダルを 90rpm (1.5Hz)の回転数で漕ぎ、左右の足の寄与により約 3Hz の周波数信号を与えて機体構造を励振させている。

ペダル漕ぎによる約 3Hz の周波数信号は定常飛行時にはテールブームとは共振しないが、ペダルの回転数を小さくすると共振が生じて安定した飛行制御に影響を与える可能性がある。

*Active Gals*

# CHICK-2000 Project

## PIO の現象

### ビデオによるサーチ

ビデオによる PIO に陥った時の時間軸と飛行機の動作を以下に示す。 の状態で機体の後部が一度着地している。

スタート	離陸							着地
8.0s	1.5s	1.2s	1.9s	2.4s	1.9s	3.1s	2.0s	

ピッチングの振動の周期は約 1.2 ~ 3.1s である。

## CHICK-2000 の PIO 現象

## VIDEO 上映

*Active Gals*

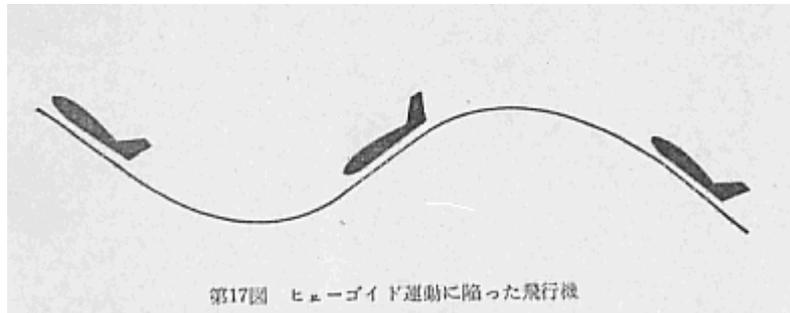
# CHICK-2000 Project

## 人力飛行機の運動解析(1/4)

### 過去的人力飛行機のヒューゴイド運動

パフィン1号は長周期モードによって生じるヒューゴイド運動に陥っている。

機体の上昇と速度の減少およびそれらの下降と増加を繰り返すヒューゴイド運動の振動周期は4秒以下であり、振動周期が数十秒とパイロットの操舵により修正可能な通常の航空機とは異なる。



人力飛行機では振動周期が操縦装置を操作するに要する時間とほぼ同じで、パイロットの操舵により修正不可能になるのが特徴である。

PIOの原因の一つであるヒューゴイド運動は過去から人力飛行機が抱えている大きな問題であると言える。

*Active Gals*

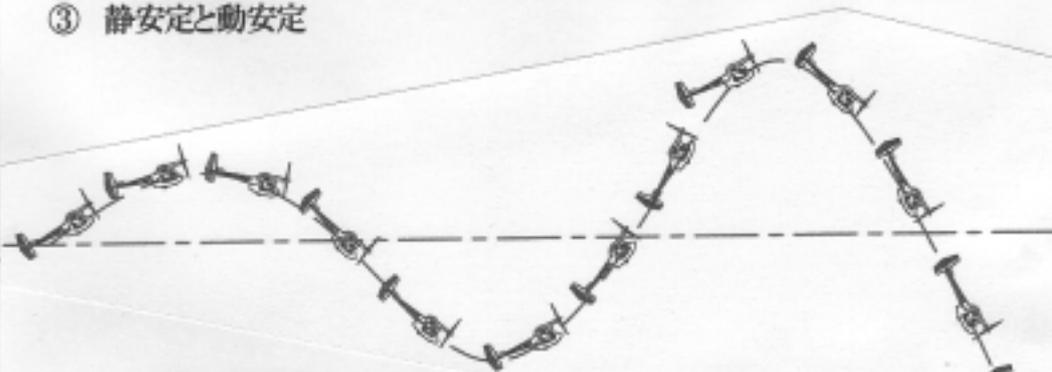
# CHicK-2000 Project

## (3) 縦方向の安定性

### ◆ 影響要因

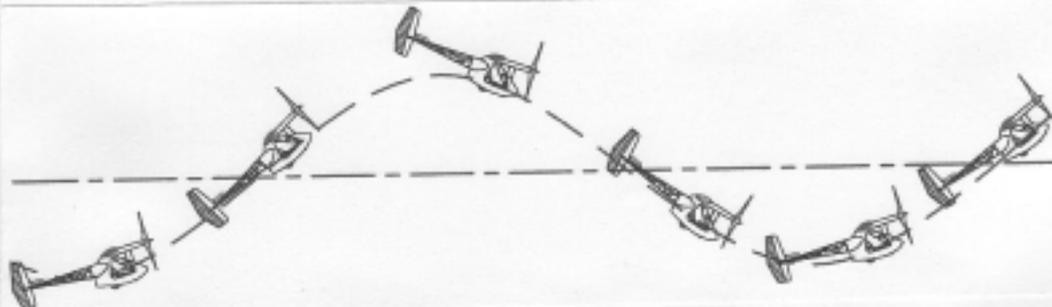
- ① 重心位置(CG)
- ② 風圧中心(CP)
- ③ 静安定と動安定

“CHicK-2000”が経験したPIO  
Pilot Induced Oscillation;パイロット誘起振動



### ヒュゴイド運動(長周期振動)

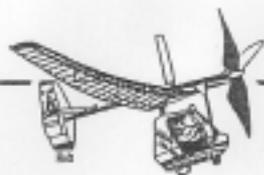
- 位置エネルギーと運動エネルギーが周期的に変換されて上下に振動
- 1回の周期が10秒を超える・長い周期で減衰が遅い
- 操縦装置の操作時間と同一時間間隔で発生
- 迎角が一定で、高度と速度の増減が発生



### ◆ 生じる現象

- ① 急上昇・急降下
- ② ピッチング
- ④ ヒュゴイド運動(Phugoid Motion)
- ⑤ PIO (Pilot Induced Oscillation);パイロット誘起振動

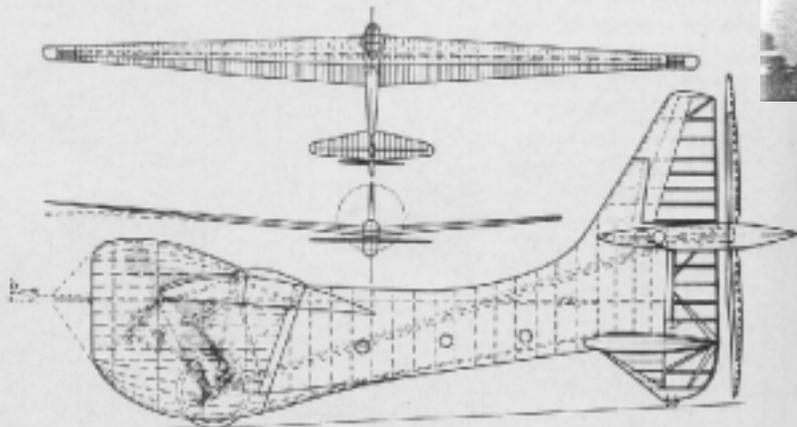
ヒュゴイド運動やPIOは、機体の剛性の影響が大きい。  
例えば、鳥人間コンテストの人カプロペラ機のテールブームに見られるように低剛性(撓みやすい)の機体は振動が減衰し易く、必ずしも適用できない。



## "Active Gals"

# CHick-2000 Project

パフィン1号



*On May 2, 1962, at the de Havilland airfield, Hatfield, Hertfordshire, England, designer J.C. Wimpenny pedaled the Puffin 993 yards. This was the first time one of the man-powered aircraft brought about by the quest for the £5,000 prize put up by Henry Kremer flew over half a mile. (3-view courtesy of Jim Newman.)*

*Active Gals*

# CHick-2000 Project

## 人力飛行機の運動解析(2/6)

### 解析のためのシミュレーション

#### シミュレーションの目的

シミュレーションによるPIOの再現による原因の確認  
飛行制御系の安定性・不安定性の評価  
実際に行った対策が理論的に対策となっていることの確認  
テール boom の剛性(柔軟性)の影響

### 縦の運動方程式

X軸、Z軸およびピッチ軸の3軸の方程式

$$X \text{ 軸} : (s - X_u) u - X_{\dot{u}} + W_0 q + (g \cos \theta_0) = X_{t \ t}$$

$$Z \text{ 軸} : -Z_u u + \{(U_0 - Z_{\dot{u}}) s - Z_{\ddot{u}}\} \\ - \{(U_0 + Z_q) s - g \sin \theta_0\} = Z_{e \ e} + Z_{t \ t}$$

$$\text{ピッチ軸} : -M_u u + (M_{\dot{s}} s + M_{\ddot{s}}) + (s^2 - M_q s) \\ = M_{e \ e} + M_{t \ t}$$

入力：昇降舵  $\delta_e$ 、推進力  $T$

出力：ピッチ角  $\theta$ 、ピッチ角速度  $q$ 、迎角  $\alpha$ 、前進速度  $u$

トリム条件での定常運動、あるいは定常運動まわりの微小擾乱による動的運動の場合に成り立つ。

空気の見かけの質量(付加質量)と地面効果の影響を考慮した。なお Reduced Frequency による非定常空気力による影響は含んでいない。

*Active Gals*

# CHick-2000 Project

## 人力飛行機の運動解析(3/6)

### PIO のシミュレーション結果 PIO を生じさせた原因の推定

(ケース 1) 推力増加に起因する振幅増加(理論的には制御可能)による制御困難

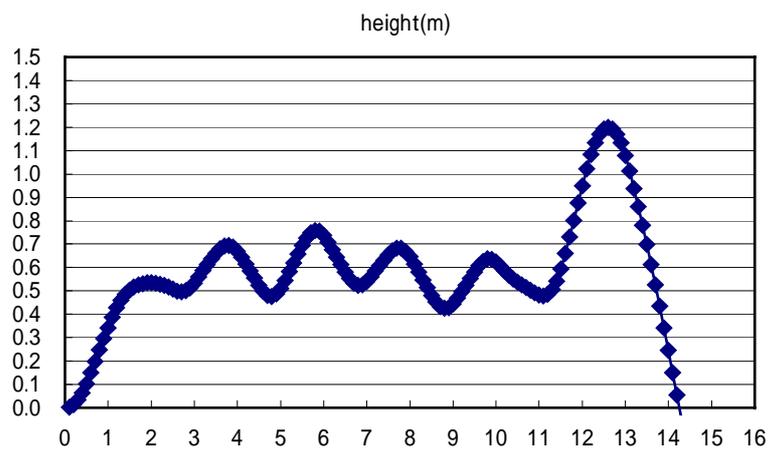
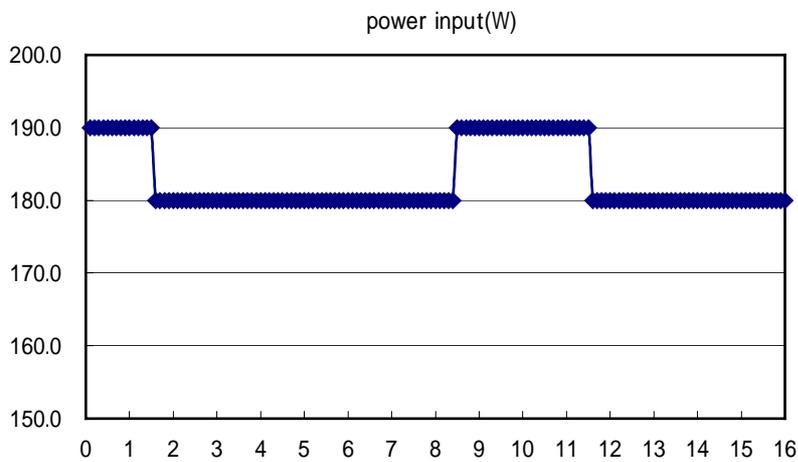
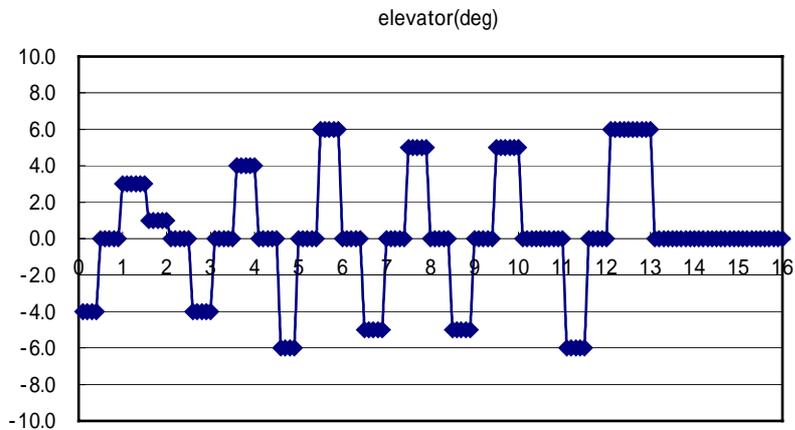
(ケース 2) バックサイドパラメータ( $1/Tr$ )が負になり不安定になることによる制御不能

ケース 1 とケース 2 のシミュレーション結果に相当するグラフを以下に示す。  
なお、シミュレーション結果のグラフにおいて横軸は時間(second)、縦軸は以下のとおりである。

昇降舵角(elevator angle)(deg)  
パワー入力(power input)(W)  
高度(height)(m)

*Active Gals*

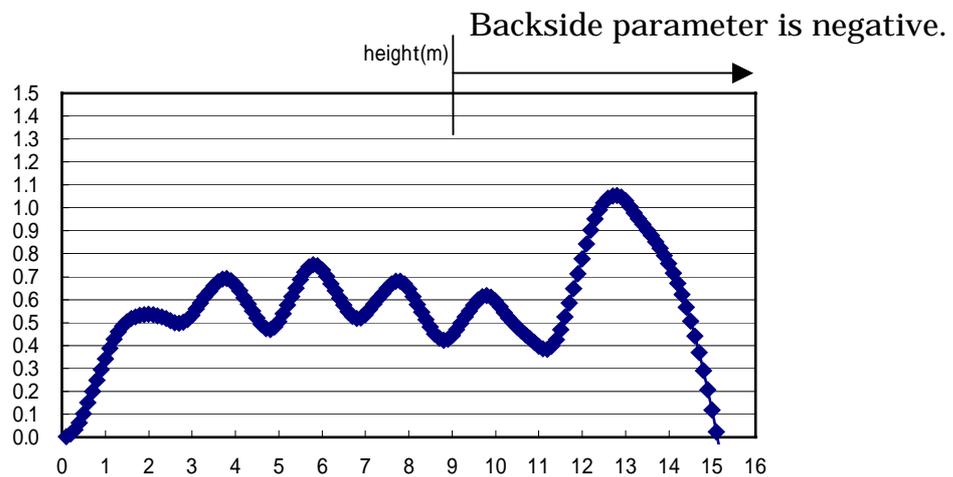
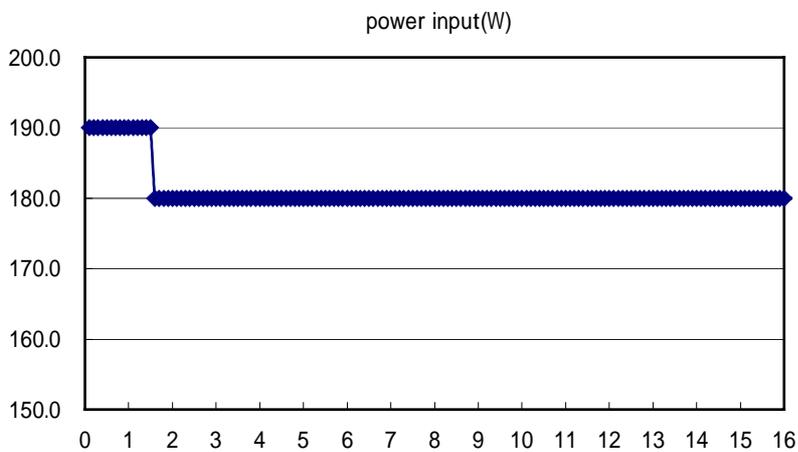
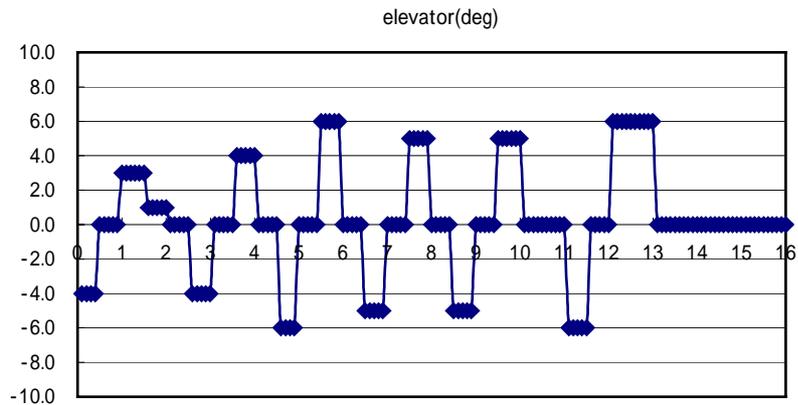
# CHick-2000 Project



(ケース 1) 推力増加に起因する振幅増加(理論的には制御可能)による制御困難

*Active Gals*

# CHICK-2000 Project



(ケース 2)バックサイドパラメータ(1/Tr)が負になり不安定になることによる制御不能

*Active Gals*

# CHICK-2000 Project

## 人力飛行機の運動解析(4/6)

### テール-ム剛性(柔軟性)の影響(1/2)

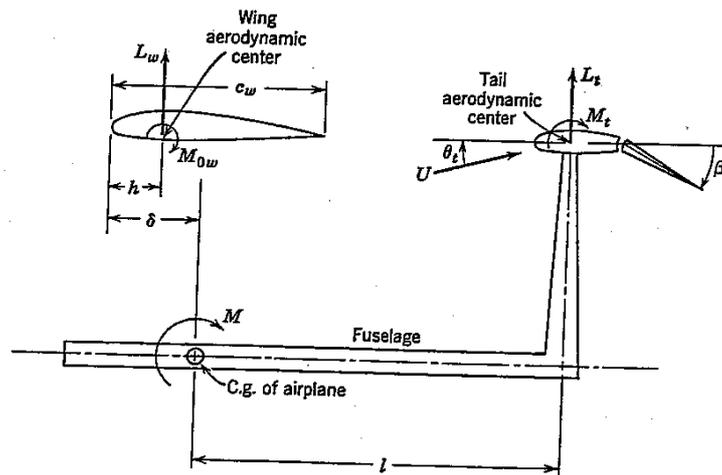
テール-ムの剛性は飛行機の縦の安定性に寄与し、縦の安定微係数に影響を与える。テール-ムの剛性を考慮した縦の安定微係数の計算を行う。ここでテール-ムの剛性を以下の通り定義する。

$K_1$ : 飛行機の重心に関して 1rad の回転に対する水平尾翼の空力中心に作用する全揚力

$K_2$ : 飛行機の重心に関して 1rad の回転に対する水平尾翼の空力中心に作用する全ピッチングモーメント

水平尾翼の揚力  $L_t$ 、ピッチングモーメント  $M_t$  に対してテール-ムの剛性  $K_1$ 、 $K_2$  による構造変形に伴う水平尾翼の迎角の変化  $\theta_t$  は以下のようになる。

$$\theta_t = L_t / K_1 + M_t / K_2$$



*Active Gals*

# CHICK-2000 Project

## 人力飛行機の運動解析(5/6)

### テール boom の剛性(柔軟性)の影響(2/2)

$L_t$ 、 $M_t$ の式を代入して  $\dot{\alpha}_t$  について解くと、

$$\dot{\alpha}_t / \alpha_t = A / B$$

$$A = q_t S_t (a_t / K_1 - m C_t / K_2)$$

$$B = 1 - q_t S_t a_t / K_2$$

ここで、 $q_t$  : 水平尾翼の動圧、 $S_t$  : 水平尾翼面積、 $a_t$  : 水平尾翼の揚力傾斜、 $m$  :  $C_{mt} / C_e$ 、 $C_t$  : 水平尾翼の空力平均翼弦、である。

これにより昇降舵に関する縦のモーメントの安定微係数  $C_{m\dot{\alpha}_e}$  を計算することができる。

$$C_{m\dot{\alpha}_e} = C_m / \alpha_t = - (q_t S_t / q S) [(A / B + a_t l / C_w + m C_t / C_w)]$$

ここで、 $q$  : 主翼の動圧、 $S$  : 主翼面積、 $l$  : 主翼の空力中心と水平尾翼の空力中心の距離、 $C_w$  : 主翼の空力平均翼弦、である。

さらに水平尾翼の迎角の変化  $\alpha_t$  は A、B を用いて以下のように表される。

$$\alpha_t = A (\alpha_t + \alpha_{t0}) / (1 - A) + q_t S_t C_t C_{m0t} / (1 - A) K_2$$

ここで、 $\alpha_t$  : 迎角、 $\alpha_{t0}$  : 水平尾翼の初期設定迎角、 $C_{m0t}$  : 水平尾翼のピッチングモーメント係数、である。

上記の剛性を含めた安定微係数  $C_{m\dot{\alpha}_e}$  と水平尾翼の迎角の変化  $\alpha_t$  を、これまで使用してきた縦方向の運動方程式に含める。

*Active Gals*

# CHICK-2000 Project

## 人力飛行機の運動解析(6/6)

テールブームの剛性を考慮した縦の運動シミュレーション結果  
テールブームの剛性を考慮した場合の高度のステップ応答

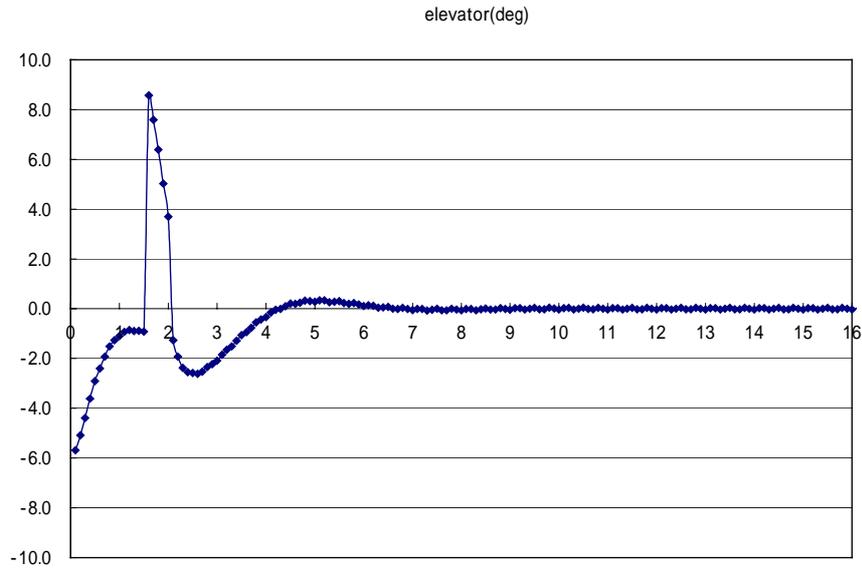


図 1-1 ヒッチ角を考慮した昇降舵入力

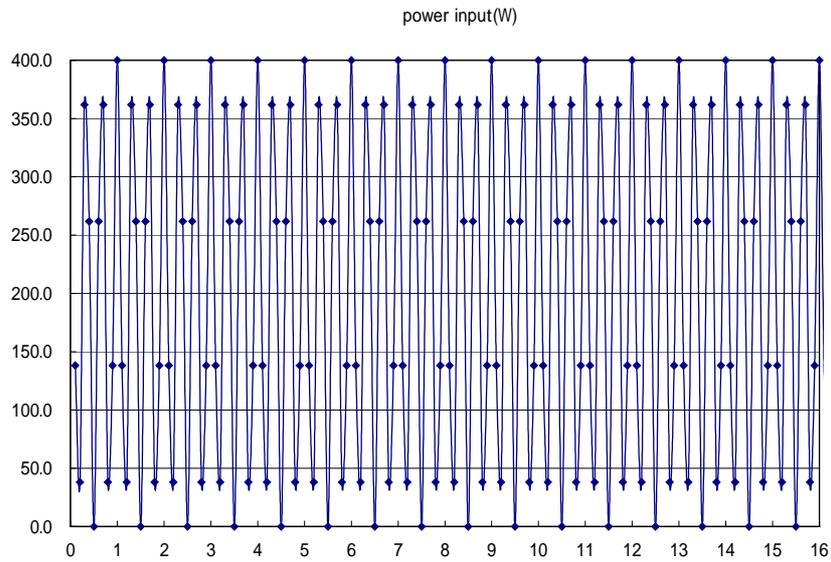


図 1-2 パワー入力(3Hz)

*Active Gals*

# CHick-2000 Project

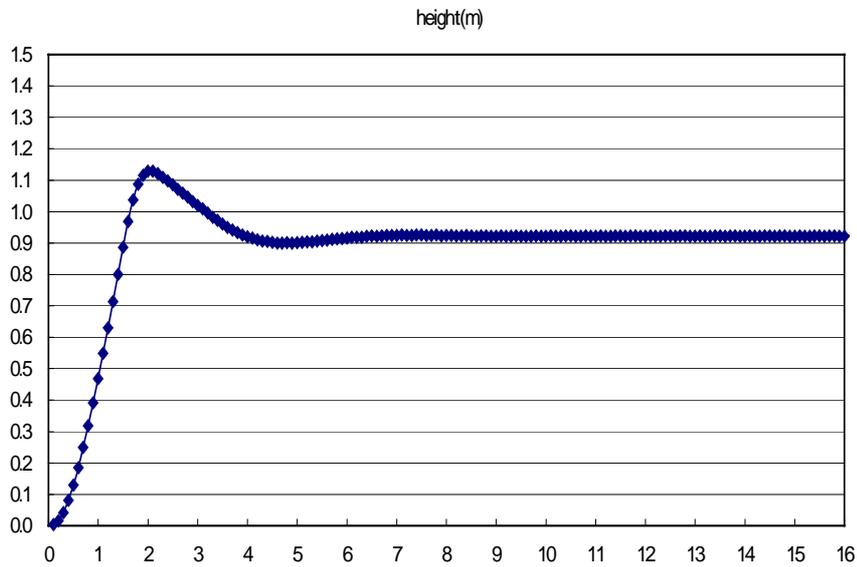


図 1-3 テールームを剛体と仮定した場合の高度のステップ 応答

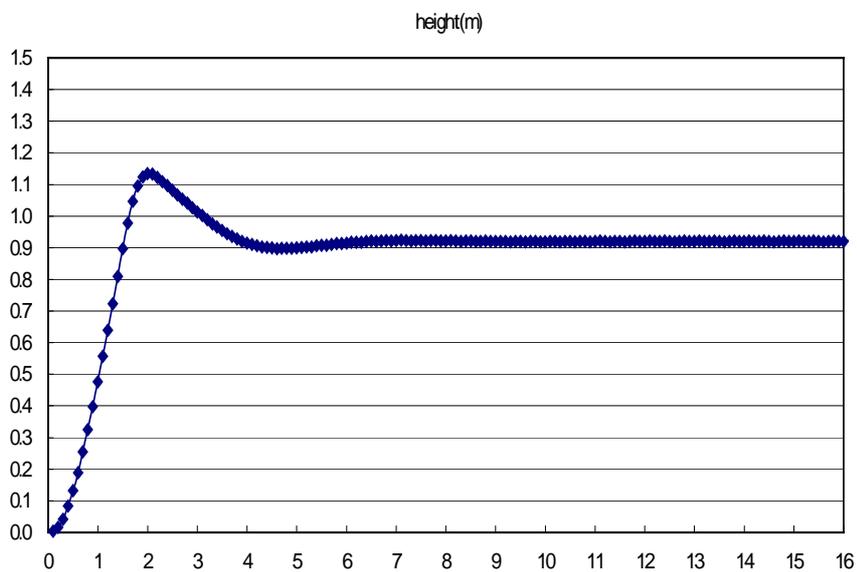


図 1-4 テールームの剛性を考慮した場合の高度のステップ 応答

*Active Gals*

# CHick-2000 Project

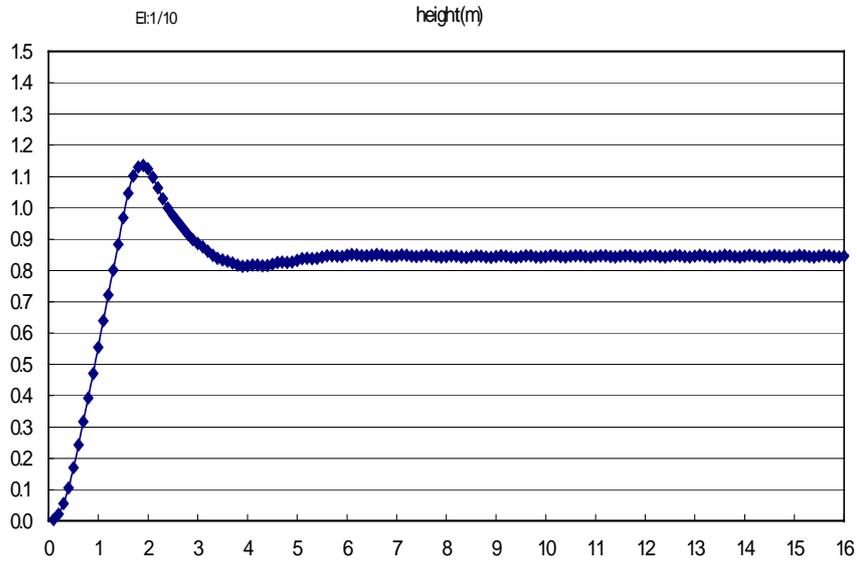


図 1-5 テール $\mu$ の剛性を 1/10 とした場合の高度のステップ 応答

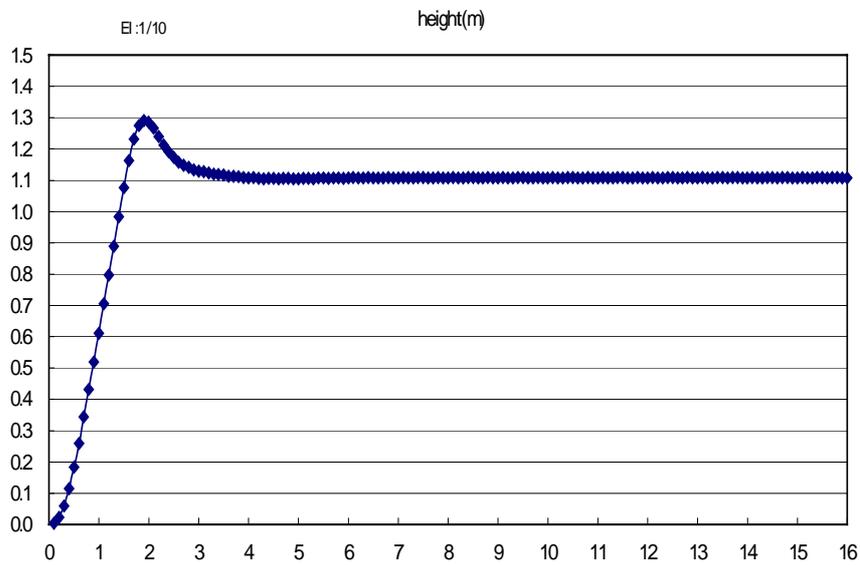


図 1-6 剛性による尾翼の傾きを含まない高度のステップ 応答

*Active Gals*

# CHicK-2000 Project

パワー入力(0.5Hz)の周波数を低くした場合の高度のステップ 応答

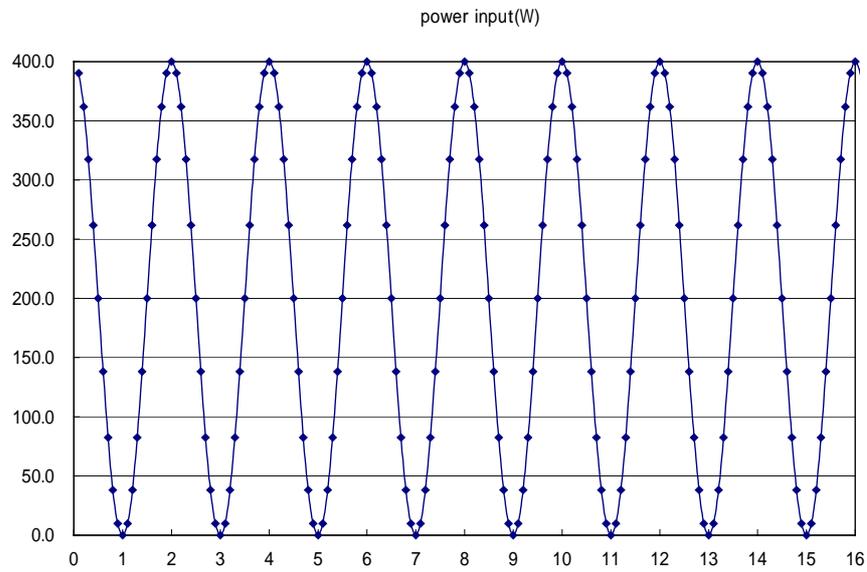


図 1-7 パワー入力(0.5Hz)

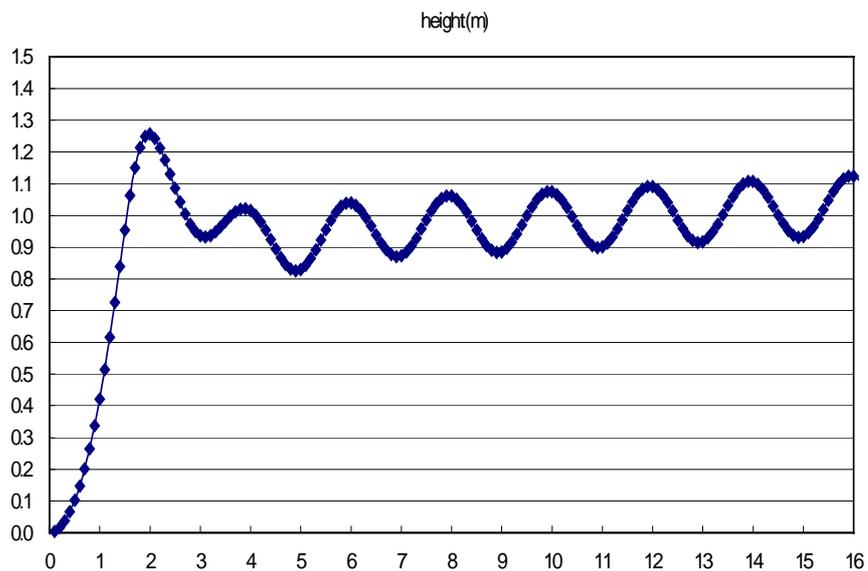


図 1-8 パワー入力(0.5Hz)に対する  
高度のステップ 応答

*Active Gals*

# CHICK-2000 Project

## 考察とまとめ(1/4)

### 計算結果からの考察

(1) CHICK-2000 のテール boom の剛性は縦の運動制御に対しては十分に確保されており、剛体と仮定した場合と差がないことがわかる。

また 3Hz のパワー入力による振動等は出力結果にはほとんど出でおらず、運動制御性能を低下させないことがわかる。

(2) テール boom の剛性を現状の 1/10 とした場合、昇降舵角に対するピッチング モーメント係数  $C_{m\dot{\alpha}}$  が大きくなるため応答特性が良くなり、この影響のみを考慮すると図 1-6 のように高度が高くなる結果となるが、剛性による水平尾翼の迎角の変化  $\dot{\alpha}$  が大きくなることにより高度の応答が悪くなってキャンセルされ、高度の応答としてはテール boom の剛性が通常の場合とあまり変わらない結果となる。

(3) パワー入力の周波数を小さくすると、すなわちペダルの回転数を低くすると、これによる振動が高度の変化に現れ、制御性能が劣化する。

これが PIO を引き起こした原因の一つである可能性がある。

*Active Gals*

# CHICK-2000 Project

## 考察とまとめ(2/4)

### PIOを引き起こした原因

(4)  $\beta$  ロットは長周期モードの周期が短いためこれを打ち消す操舵を行うことができず、昇降舵入力のタイミングが長周期モードによる振動の位相とずれたため、高度が著しく上昇した可能性がある。

その後理論的には制御可能であるが、機体の姿勢は急勾配であり制御困難な状態に陥った可能性がある。

(5)  $\beta$  ッサイドパラメータ( $1/Tr$ )が0に近い値で当初は安定していたが、機体の状態が変化したことにより $\beta$  ッサイドパラメータが負となって経路角不安定となり、高度制御不能となった可能性がある。

(6)  $\beta$  ダルの回転数を低くしたことによりパワー入力による振動が高度の変化に現れ、この振動を修正できない制御困難な状態に陥った可能性がある。

*Active Gals*

# CHick-2000 Project

## 考察とまとめ(3/4)

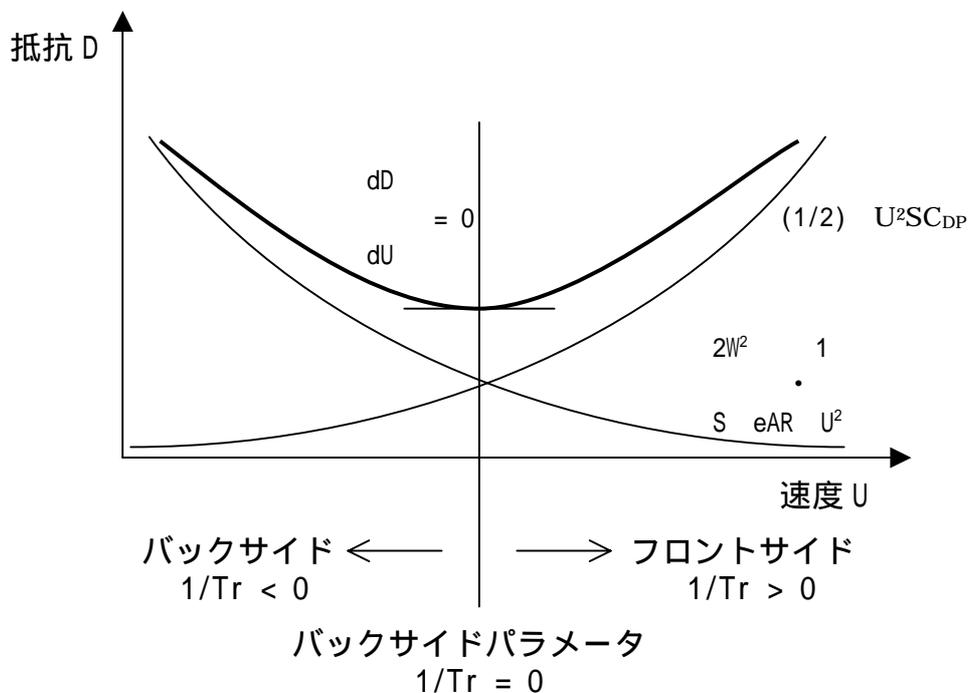
### バックサイドパラメータと抵抗 - 速度曲線との関係について

バックサイドパラメータ( $1/Tr$ )が正であれば高度制御可能であり、負であれば高度制御不能(不安定)となる。

一方、抵抗 - 速度曲線との関係を考えると、抵抗が最小( $dD/dU=0$ )になる速度にてバックサイドパラメータは0となる。

しかしながら人力飛行機では抵抗が最小になる速度を定常速度とするように設計されるため、定常速度での高度制御は本質的に不安定に近い安定状態になると考える。

結論として飛行速度を定常速度以上としてバックサイドパラメータの値を正にすることにより安定性を向上させることが重要な対策になると考える。



*Active Gals*

# CHick-2000 Project

## 考察とまとめ(4/4)

### 人力飛行機の安定性と制御に関する注意点

(7) 人力飛行機は低速のため縦の振動の周期が短く、長周期モードによる振動が生じるとパイロットが修正できない場合が多い。  
長周期モードの周期を長くするには定常速度を上げることが有効と考える。

(8) バックサイトパラメータが正であれば高度制御可能であり、負であれば高度制御不能(不安定)となる。  
一方、抵抗 - 速度曲線との関係を考えてみると、抵抗が最小( $dD/dU=0$ )になる速度にてバックサイトパラメータは0となる。

しかしながら人力飛行機では抵抗が最小になる速度を定常速度とするように設計されるため、定常速度での高度制御は本質的に不安定に近い安定状態になる。  
飛行速度を定常速度以上としてバックサイトパラメータの値を正にすることにより安定性を向上させること有効になると考える。

(9) ペダルの回転数によるパワーの入力周波数をテール boom の曲げの固有振動数から離れた少し大きな値として、共振を生じさせない制御帯域にてペダルを漕ぎ続ける必要があると考える。

*Active Gals*