

## パラグライダーのフレア操作の検討

赤坂剛史\*<sup>1</sup>・別府護郎\*<sup>2</sup>・東 昭\*<sup>3</sup>

### An Investigation on Flare Maneuver of Paraglider

by

Takeshi AKASAKA, Goro BEPPU  
and Akira AZUMA

(Received on Mar. 31, 1997)

#### Abstract

The performance of actual landing flare of paraglider is obtained from manned flights. The dynamics of landing flare of paraglider is computed by using equations of motion, which are extended to include the added mass of the canopy, confirmed to agree well with flight test data. We introduced the flare condition and investigated the flare operation which is to pull down a pair of control lines. Comparing the 1 step and 2 steps flare operations, it is found that the 2 steps operation is useful. It doesn't satisfied the flare conditions when the trim velocity is slow or the effectiveness of control is too good and is too bad.

It is found that magnitude of velocity of paraglider is possible to be decreased without a large pitch up if a pair of control lines is pulled down appropriately.

**Keywords :** Paraglider, Landing flare, Equation of Motion

#### 1. はじめに

近年スカイスポーツが盛んに行われている。この中で、特に手軽に簡単に自由に空を飛べるというフレーズで登場したパラグライダー (para glider) の体験人口の増加は著しく、兄貴分であるハンググライダー (hang glider) をやすやすと追い越してしまい、その人気は測り知れない。一方、それに伴い事故件数も増える傾向にある。パラグライダーの翼は、剛な桁材や外皮をもたず、ナイロン等の軽量な布で形成された膜翼であり、突風等の外乱で、翼が変形を起こし、動特性が大きく変化する。パラグライダーは当初、降下するためのパラシュートの延長として開発され、翼厚は厚くアスペクト比もそれほど

大きくはなかった。しかし、娯楽用のスカイスポーツとして脚光を浴びてからは、グライダーとしての意味合いがより強くなり、滑空比を向上させるために、翼厚は薄くアスペクト比は大きくなり、その結果翼がより変形しやすくなっている。また翼に比べ、人間は振子の錘のように下方に位置し、翼の動特性と振子運動との影響も分かっていない。パラグライダーの動特性には未解決の問題があると言える。

本研究では、振子運動の問題として、フレアによる運動の解析を試みた。航空機や鳥などの飛行物体は着陸するためには、空中から降下してこなければならぬが、降下速度を保ったままでは地面に激突してしまう。そこで、着陸以前に迎角増加により揚力増加を行い、垂直方

\* 1 工学研究科航空宇宙学専攻博士課程後期 \* 2 工学部航空宇宙学科教授 \* 3 東京大学名誉教授

向に力を発生させ、飛行経路を変更させる必要がある。この運動をフレアと言う。パラグライダーのフレア操作は翼（以下キャノピ）の後ろに左右に付いている熊手状の操縦索（以下コントロールライン）を左右同時に引く。これによりキャノピの後縁部分が下方に折れ曲がり、揚力が増加し、パイロットはソフトに着地することができる<sup>1,2)</sup>。しかし、フレアは過渡現象であり、かつキャノピの減速に伴いパイロットは前方へ振り出される振子運動を生じるため、コントロールラインの引き量やタイミング、フレア開始高度は、パイロットの多くの経験から感覚的に決められているのが現状であり、適切なフレア操作ができないパイロットは、着地時に捻挫等の怪我を体験している。また、パラグライダーを利用した自動着陸の研究が近年盛ん行われているが、着地に関しては様々な課題が存在するようである<sup>3)</sup>。

したがって、本研究では、飛行実験で取得された、フレアから着陸までのデータからフレアの方法を紹介し、次に飛行実験で妥当性が確認された運動方程式を用いて<sup>4-6)</sup>、様々なフレア操作に対する応答計算を行い、パラグライダーのフレア操作を定量的に検討する。

### 1.1 記号

#### [物理量]

- $A_{m,n}$  : 付加質量
- $a_{x,i}$  : 前後加速度
- $a_{x,i}^*, a_{z,i}^*$  :  $i$ 座標系での  $i$  加速度
- $(C_D)_i$  :  $i$  の抗力係数
- $(C_L)_i$  :  $i$  の揚力係数
- $(C_M)_i$  :  $i$  の縦揺モーメント係数
- $c_i$  :  $i$  の代表長さ
- $F_{i,x}, F_{i,z}$  : 機体座標系での力
- $I_{y,i}$  :  $i$  の慣性モーメント
- $l_i$  : 機体座標系から  $i$  座標系の距離
- $M_{i,y}$  : 機体座標系の  $Y$  軸周りのモーメント
- $q$  : 機体座標系の  $Y$  軸周りの縦揺角速度
- $q_i$  :  $i$  座標系の  $Y$  軸周りの縦揺角速度
- $S_i$  :  $i$  の面積
- $T_1, T_2, T_3$  : 操舵時間
- $t_f$  : フレアの条件を満足する時間
- $u, w$  : 機体座標系での機体座標系原点速度
- $u_i, w_i$  : 機体座標系での  $i$  の速度
- $u_{x,i}, u_{z,i}$  :  $i$  座標系での  $i$  の速度
- $v$  : 機体座標系原点速度の大きさ  
( $=\sqrt{u^2+w^2}$ )

- $X_i, Z_i$  : 機体座標系での  $i$  の重心位置
- $\alpha_i$  :  $i$  の迎角
- $\delta_m$  : コントロールラインの引き量
- $\theta$  : オイラ角
- $\theta_i$  :  $i$  座標系の  $Y$  軸周りの回転角

#### [上添え字]

- $A, G, I$  : 空気力, 重力, 慣性力に関する項
- $(\dot{\quad})$  : 時間微分

#### [下添え字]

- $i$  : ボディ (b) またはキャノピ (c)
- min : 最小値
- $a, q, \delta_m$  :  $a, q, \delta_m$  に関する微係数
- 0 : トリム値

## 2. 飛行実験

飛行実験は、スカイスポーツで用いられているパラグライダー実機を用いて行い、離陸から着地して停止するまでのデータを取得した。その中のフレアから着地して停止するまでのデータを Fig. 2.1 に示す<sup>5)</sup>。Fig. 2.1 は上4段に各状態量、最下段にコントロールラインの引き量  $\delta_m$  の時間履歴を示している。このときの巡航速度は約 9.8m/s、パイロットも含めたパラグライダーの全質量は

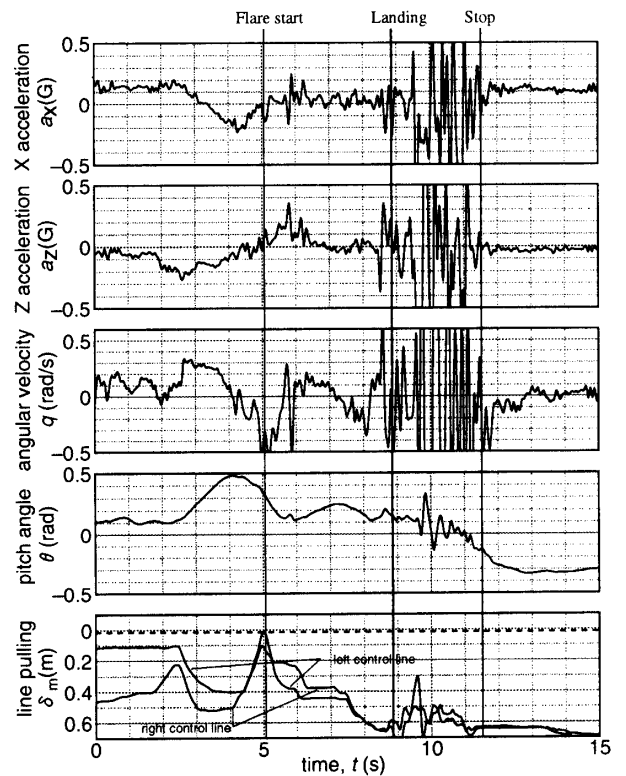


Fig 2.1 Experimental data for a manned flight in landing phase.

約 100kg である。

フレア操作を開始する前から、パラグライダーは角速度  $q$  に見られるように、縦揺運動していてトリムがとれていない。フレア開始に伴い、コントロールラインを左右同時に約 3.8 秒間に 0.7m 引くフレア操作を行っていることが確認される。しかし、フレア操作を厳密に観察すると、コントロールラインを 2 段階に分けて引いている。1 段階目で約 0.4m 引き、2 段階目で約 0.3m 引いている。この 2 段階に分ける操作方法は、他の飛行実験データにも見られる現象で、興味深い。その後着地し、パイロットは停止する。このフレア操作時のコントロールラインの引き量は、通常の旋回等に用いられる引き量よりも大きいものである。

### 3. 座 標 系

Fig. 3.1 に座標系を示す<sup>4-6)</sup>。空間に固定された慣性座標系  $(X_I, Y_I, Z_I)$  からオイラ角  $\theta$  により、パラグライダーに固定された機体座標系からパイロット (以下ボディ) 方向に  $l_b$  移動し、 $Y$  軸まわりに  $\theta_b$  回転してボディ座標系  $(X_b, Y_b, Z_b)$  に、同様にキャノピ方向に  $l_c$  移動し (負の向き)、 $\theta_c$  回転してキャノピ座標系  $(X_c, Y_c, Z_c)$  にそれぞれ変換される。ここで、 $Y, Y_b, Y_c$  は紙面奥方向に正である。

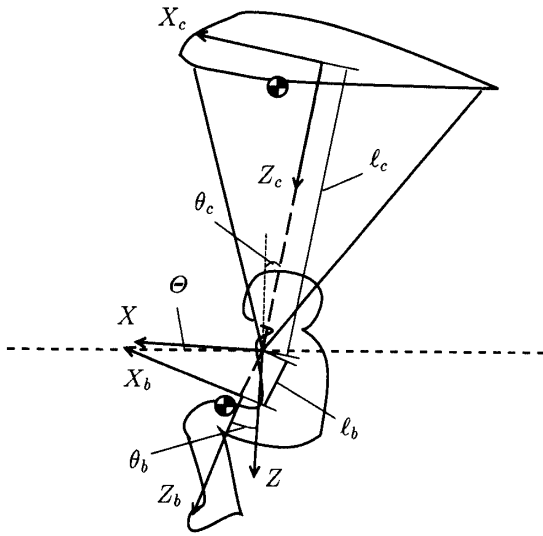


Fig. 3.1 Definition for coordinate system.

### 4. 運動方程式

フレアでは運動が大きく微少擾乱という仮定は成立しないため、非線形性を考慮して、縦の運動方程式を表す<sup>3-5)</sup>。なお、迎角は失速角以下とし、空気力の迎角に関する線形性は保たれるとする。

力はボディ ( $i=b$ ) とキャノピ ( $i=c$ ) に働く重力と空気力、慣性力を機体座標系の  $X$  軸,  $Z$  軸について、またモーメントは機体座標系の  $Y$  軸周りについて表す。

まず、重力  $F_{i,x}^G, F_{i,z}^G$  と重力によるモーメント  $M_{i,y}^G$  は次のように表される。

$$\begin{aligned} F_{i,x}^G &= -m_i g \sin \theta, \\ F_{i,z}^G &= m_i g \cos \theta, \\ M_{i,y}^G &= -m_i g \{ \bar{x}_i \cos(\theta + \theta_i) + (\bar{z}_i + l_i) \sin(\theta + \theta_i) \}. \end{aligned} \quad (4.1)$$

ここで、 $m_i$  は  $i$  の質量、 $\bar{x}_i, \bar{z}_i$  は  $i$  座標での  $i$  の重心である。次に、空気力  $F_{i,x}^A, F_{i,z}^A$  と空気力によるモーメント  $M_{i,y}^A$  は次のように表される。

$$\begin{aligned} F_{i,x}^A &= \frac{1}{2} \rho v S_i \{ (C_L)_i \sin(\alpha_i - \theta_i) - (C_D)_i \cos(\alpha_i - \theta_i) \} \\ &\quad - (F_{x,i}^{AM} \cos \theta_i + F_{z,i}^{AM} \sin \theta_i), \\ F_{i,z}^A &= \frac{1}{2} \rho v S_i \{ -(C_L)_i \cos(\alpha_i - \theta_i) - (C_D)_i \sin(\alpha_i - \theta_i) \} \\ &\quad - (-F_{x,i}^{AM} \sin \theta_i + F_{z,i}^{AM} \cos \theta_i), \\ M_{i,y}^A &= \frac{1}{2} \rho v^2 S_i C_i (C_M)_i - M_{i,y}^{AM} + (F_{i,x}^A l_i \cos \theta_i - F_{i,z}^A \\ &\quad \sin \theta_i). \end{aligned} \quad (4.2)$$

ここで、 $F_{x,i}^{AM}, F_{z,i}^{AM}$  は付加質量  $F_{i,y}^{AM}$  は付加慣性モーメントであり、

$$\begin{aligned} F_{x,b}^{AM} &= F_{z,b}^{AM} = M_{y,b}^{AM} = 0, \\ F_{x,c}^{AM} &= A_{11} \dot{u}_{x,c} + A_{33} u_{z,c} q_c + A_{35} q_c^2, \\ F_{z,c}^{AM} &= A_{33} \dot{u}_{z,c} + A_{35} \dot{q}_c - A_{11} u_{x,c} q_c, \\ M_{y,c}^{AM} &= A_{35} \dot{u}_{z,c} + A_{55} \dot{q}_c + A_{35} u_{x,c} q_c \\ &\quad + (A_{11} - A_{33}) u_{x,c} u_{z,c}. \end{aligned} \quad (4.3)$$

と表される。 $u_{x,i}, u_{z,i}$  は  $i$  座標系での  $X_i, Z_i$  方向の速度、 $q_i$  は  $i$  座標系の縦揺角速度を表す。また、 $(C_D)_i, (C_L)_i, (C_M)_i$  は空力係数、 $\alpha_i$  は  $i$  の迎角で次のように表される。

$$\begin{aligned} (C_L)_b &= 0, \\ (C_L)_c &= (C_L)_{c,0} + C_{L,a} \alpha_c + (C_{L,q}) q_c + (C_{L,\delta m}) c \delta m, \\ (C_D)_b &= (C_D)_{b,0}, \\ (C_D)_c &= (C_D)_{c,0} + C_{D,a} \alpha_c + (C_{D,\delta m}) c \delta m, \\ (C_M)_b &= (C_M)_{b,0} + (C_{M,q}) q_b, \\ (C_M)_c &= (C_M)_{c,0} + (C_{M,a}) \alpha_c + (C_{M,q}) q_c \\ &\quad + (C_{M,\delta m}) c \delta m, \\ \alpha_i &= \tan^{-1}(u_{z,i} / u_{x,i}). \end{aligned}$$

また、慣性力  $F_{i,x}^I, F_{i,z}^I$  と慣性力によるモーメント  $M_{i,y}^I$  は次のように表される。

$$\begin{aligned} -F_{i,x}^I &= (m_i + A_{i00}) \{ \dot{u} + q w + \bar{Z}_i (\dot{q} + \ddot{\theta}_i) \\ &\quad - \bar{X}_i (q^2 + \theta_i^2) + 2q \dot{\bar{Z}}_i \}, \\ -F_{i,z}^I &= (m_i + A_{i00}) \{ \dot{w} - q u - \bar{X}_i (\dot{q} + \ddot{\theta}_i) \} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\bar{Z}_i(q^2 + \dot{\theta}_i^2) - 2qX_i, \\
 & -M_{i,Y}^l = (m_i + A_{i0}^0)\{\bar{z}_i a_{x,i}^* - \bar{x}_i a_{z,i}^*\} + (I_{Y,i} + A_i^i)\dot{q}_i \\
 & -F_{i,X}^l l_i \cos \theta_i + F_{i,Z}^l l_i \sin \theta_i. \quad (4.5)
 \end{aligned}$$

ここで、 $I_{Y,i}$  は  $i$  の慣性モーメント、 $A_{i0}^0$ 、 $A_i^i$  はキャノピ内の空気慣性モーメントで  $i=c$  の時に存在する。また、 $a_{x,i}^*$ 、 $a_{z,i}^*$  は  $i$  座標系での加速度成分、 $\bar{X}_i$ 、 $\bar{Z}_i$  は機体座標系で表された  $i$  の重心、 $U_{X,i}$ 、 $U_{Z,i}$  は  $i$  座標での  $i$  の速度で、次のように表される。

$$\begin{aligned}
 a_{x,i}^* &= (\dot{u} \cos \theta_i - \dot{w} \sin \theta_i) + q(u \sin \theta_i + w \cos \theta_i), \\
 a_{z,i}^* &= (\dot{u} \sin \theta_i + \dot{w} \cos \theta_i) - q(u \cos \theta_i - w \sin \theta_i), \\
 \bar{X}_i &= \bar{x}_i \cos \theta_i + (\bar{z}_i + l_i) \sin \theta_i, \\
 \bar{Z}_i &= -\bar{x}_i \sin \theta_i + (\bar{z}_i + l_i) \cos \theta_i, \\
 u_{X,i} &= u \cos \theta_i - w \sin \theta_i + (\bar{z}_i + l_i) q_i, \\
 u_{Z,i} &= u \sin \theta_i + w \cos \theta_i - \bar{x}_i q_i, \\
 q_i &= q + \dot{\theta}_i. \quad (4.6)
 \end{aligned}$$

したがって、運動方程式は次のように表される。

$$\begin{aligned}
 (F_{b,X}^c + F_{b,X}^A + F_{b,X}^l) + (F_{c,X}^c + F_{c,X}^A + F_{c,X}^l) &= 0, \\
 (F_{b,Z}^c + F_{b,Z}^A + F_{b,Z}^l) + (F_{c,Z}^c + F_{c,Z}^A + F_{c,Z}^l) &= 0, \\
 M_{b,Y}^c + M_{b,Y}^A + M_{b,Y}^l &= 0, \\
 M_{c,Y}^c + M_{c,Y}^A + M_{c,Y}^l &= 0. \quad (4.7)
 \end{aligned}$$

上式の第1、2式は機体軸の  $X$  軸方向、 $Z$  軸方向の釣合式、第3式はボディの  $Y$  軸周りのモーメント、第4式はキャノピの  $Y$  軸周りのモーメントの釣合式である。

### 5. パラグライダーのフレア条件

パラグライダー等の飛行物体は少ない衝撃で着地するためにフレアを行う。飛行機の場合は、主として接地時の地面に垂直な上下速度を小さくするために、即ち経路角を零にするように着地する。一方パラグライダーの場合は、飛行速度が小さいことから、接地時の地面に垂直な上下

速度も小さいため、経路角を零にして着地することは必ずしも必要ない。しかし、パイロットは足で着地しなければならないので、出来る限り速度を小さくして、パイロット自身が転倒しないように着地しなければならない。

したがって、パラグライダーのフレアの条件は、足で着地することとフレア運動時にパイロットが不快を伴わないことに大別される。パイロットが足で着地できる条件として、(1)着地時の飛行速度は4 m/s以下、(2)つま先から接地すると転倒しやすいためか、かかとから着地する。即ちパイロットの姿勢角は正。そして、フレア運動時にパイロットが不快を伴わない条件として、(3)頭上げは20°以下、(4)減速加速度は0.35G以下<sup>7)</sup>、(5)地上2m以上からフレアを開始。これらをフレアの条件とする。

フレア操作によるコントロールラインの引き量は、飛行実験では0.7mであるが、実際に行われているパラグライダーの安全テストでは、引き量が約1mなのでこれを計算に用いる。また、トリム状態での風方向を  $X$  軸方向とし、 $u=9.8\text{m/s}$ 、 $\theta=-0.18$ 、 $\theta_b=0.13$  とする<sup>9)</sup>。

## 6. 結果と検討

### 6.1 コントロールライン操作による影響

フレア操作を、コントロールラインを1回で引き終える操作を1段階操作、数回に分けて引き終える操作を多段階操作とそれぞれ定義し、前記4章の運動方程式を数値解析した結果について考える。

まず1段階操作について検討する。Fig. 6.1に(a)ステップ状、(b)3秒間、にそれぞれコントロールラインを1m引く1段階操作でフレアをした時の操舵入力  $\delta_m$  に対する速度  $v$  の0.1倍、前後加速度  $a_x$ 、ボディの姿勢角  $\theta + \theta_b$ 、そしてフレア開始からの高度  $h$  (フレア開始高度を零とし、以下高度の低下を負で表す) の0.1倍の時

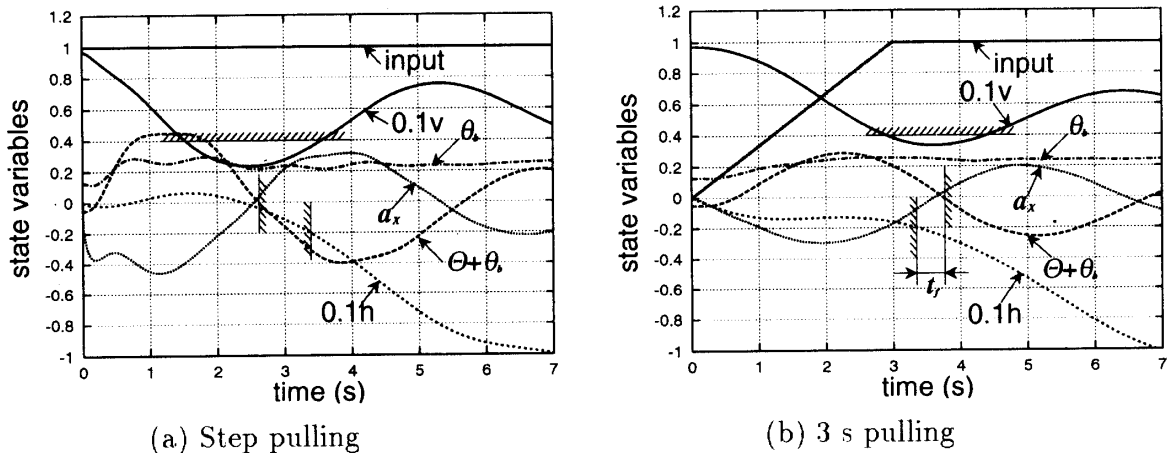


Fig. 6.1 1 step pulling of control lines.

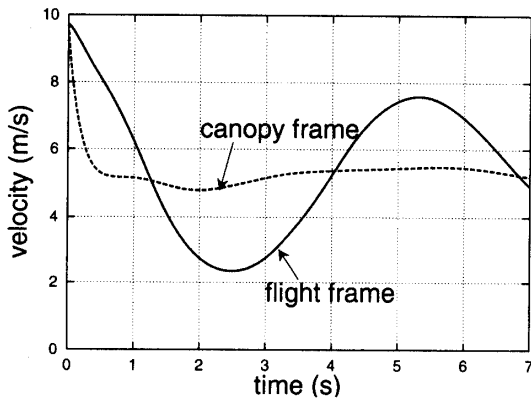


Fig. 6.2 Velocity of flight frame and that of canopy frame.

間応答を示す。また、フレアの条件から速度  $4 \text{ m/s}$  以下の限界 ( $0.1v \leq 0.4$ )、姿勢角正の限界 ( $\theta + \theta_b \geq 0$ )、高度  $2 \text{ m}$  以上の限界 ( $0.1h \leq -0.2$ ) をそれぞれ斜線で示し、その領域内のフレアの条件を満足する時間を  $t_f$  とする。ここで、人間がある信号を認識してから動作を開始するまでの反応時間は  $0.1 \sim 0.4$  秒で<sup>8,9)</sup>、その中間値の  $0.25$  秒を代表反応時間を選ぶ。そうすると、パイロットがフレアの条件を満足する領域に入ってからフレア操作を開始するまでに  $0.25$  秒の操作遅れがあり、 $t_f$  は  $0.25$  秒以上でなければならない。なお、1段階操作でコントロールラインを引き終えるまでにかかる時間を  $T_3$  秒とする。

(a), (b)を比較すると、コントロールラインを急激に引く(a)の方が速度の減少は大きく速度限界内であるが、姿勢角と前後加速度は大きな振動を生じ、またフレア開始からの高度は  $2 \text{ m}$  以下と低くなり姿勢角及び高度限界から、フレアの条件を満足せず、 $t_f$  が現れない。(b)の方は(a)ほど速度の減少は大きくないが、速度と姿勢角、高度の限界からフレアの条件を満足し  $t_f = 0.42$  である。ここで、速度は機体座標系原点の速度であるが、ボディ座標系と非常に近いため、ボディ座標系原点の速度と大差なく、この速度をパイロットの着地速度と考える。一方、キャノピ座標系原点の速度は Fig. 6.2 に示される関係がある。Fig. 6.1(a)の時の速度を示しているが、キャノピの速度は、機体座標系原点の速度ほど、速度の減少は大きくないことがわかる。これは、機体座標系原点の速度が最小になるとき、キャノピは頭下げ運動を生じているため、頭下げ運動による縦揺角速度がキャノピの速度の減少を抑えていると考えられる。

次に、多段階操作の中で、特に2段階操作について検討する。2段階操作は飛行実験でも見られたが、主に初心者向けのパラグライダー講習で良く使われる操作方法で

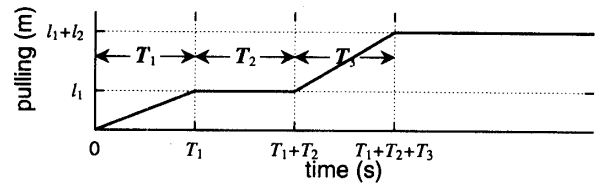


Fig. 6.3 Definition for 2 steps pulling of control lines.

あり、Fig. 6.3 に示すように定義する。1段階目の操作では  $T_1$  秒間に  $l_1 \text{ m}$  引き、 $T_2$  秒後に2段階目の操作を開始し、2段階目の操作で  $T_3$  秒間に  $l_2 \text{ m}$  引く。

そこで、経験的に  $T_1 = 1$  秒、 $l_1 = 0.4 \text{ m}$ 、 $l_2 = 0.6 \text{ m}$  とし、 $T_2$  と  $T_3$  を変化させて計算を行う。

Fig. 6.4 に  $T_2 = 0$  秒で、(a)  $T_3 = 0$  秒、(b)  $T_3 = 2$  秒の時の2段階操作でフレアを行った時の時間応答を示す。1段階目の操作により、速度は減少し、姿勢角と前後加速度は大きな振動を生じる。2段階目の操作では、(a), (b)を比較すると、コントロールラインを急激に引く(a)の方が速度の減少は大きい、姿勢角と前後加速度は大きな振動を生じ、高度は  $2 \text{ m}$  以下と低くなり姿勢角及び高度限界からフレアの条件を満足せず、 $t_f$  が現れない。(b)の方は(a)ほど速度の減少は大きくないが、フレアの条件を満足し  $t_f = 0.24$  である。

また Fig. 6.4 に  $T_2 = 1$  秒で、(c)  $T_3 = 0$  秒、(d)  $T_3 = 1$  秒の時の2段階操作でフレアを行った時の時間応答を示す。 $T_2 = 0$  秒と同様に、 $T_2 = 1$  秒の時も1段階目の操作により各状態量に振動が生じるが、 $T_2 = 0$  秒との違いは2段階目の操作前に1秒の時間間隔があることにより、各状態量が減衰する向きに振動し、その時に2段階目の操作が始まることである。2段階目の操作でコントロールラインを急激に引く(c)の方が速度の減少は大きい、姿勢角と前後加速度の振動は大きくなる。これは  $T_2 = 0$  秒後の時と同様であるが、 $T_2 = 0$  秒と比べ振動が小さく、フレアの条件を満足し  $t_f = 0.33$  である。しかし、(c)には2段階目の操作によって、姿勢角  $\theta + \theta_b$  に見られる周期約1秒の振動が現れる。これはボディの振動であり、状態量が減衰する向きに振動し始めた時に急激な2段階目の操作をすると、ボディの振動が生じることを意味している。(d)の方は(c)ほど速度の減少は大きくないが、フレアの条件を満足し  $t_f = 0.5$  である。ボディの振動は生じても小さい。

なお、Fig. 6.4 も図中に速度  $4 \text{ m/s}$  以下の限界、姿勢角正の限界、高度  $2 \text{ m}$  以上の限界を斜線で示した。

Fig. 6.5(a)にフレア操作後得られる応答の最小速度と最大頭上げ角の関係を示す。図中の数字は  $T_3$  の時間、斜線は姿勢角  $\theta + \theta_b$  の正の限界である。最小速度が小

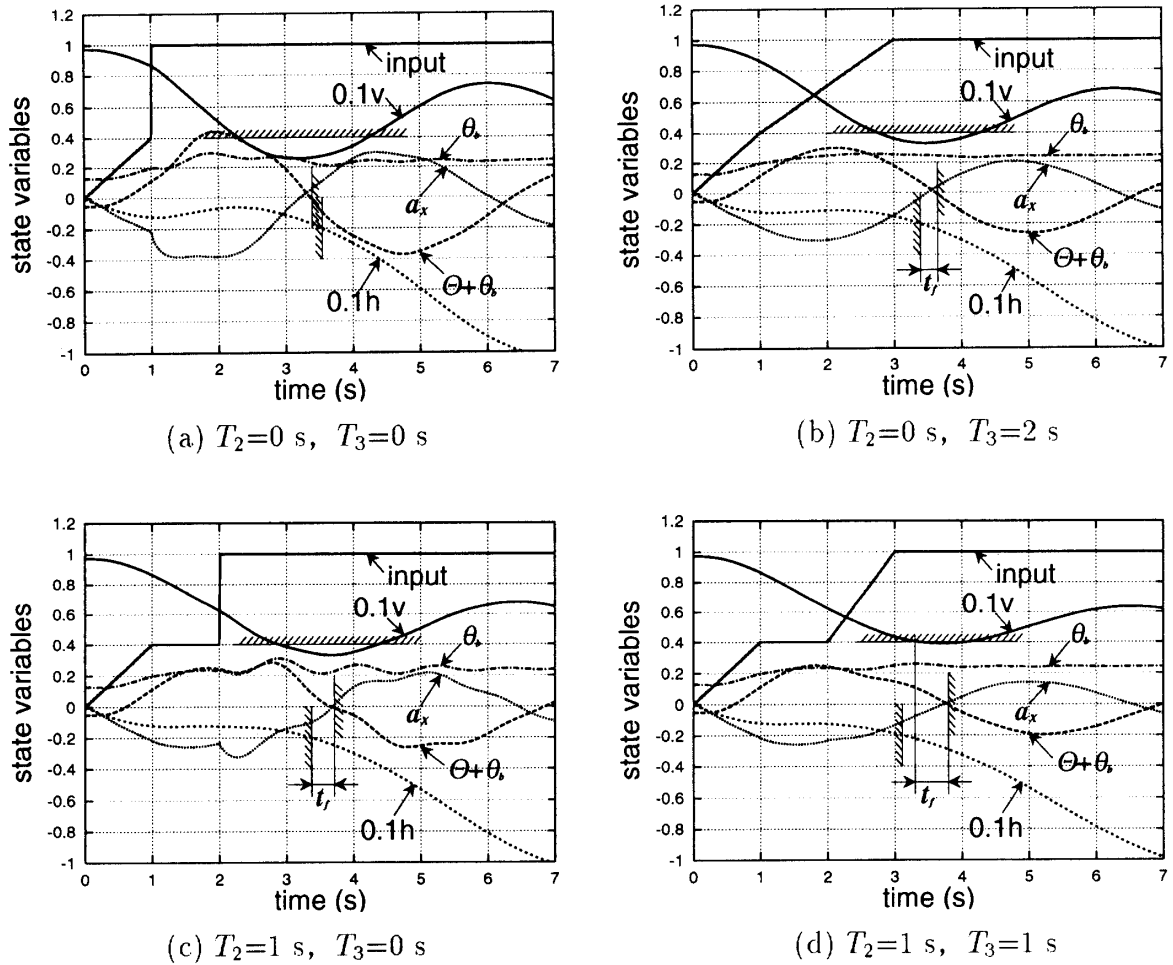


Fig. 6.4 2 steps pulling of control lines.

さい程最大頭上げ角が大きくなる。Fig. 6.5(b)にフレア操作後得られる応答の最小速度と負の最大前後加速度の関係を示す。図中の数字は  $T_3$  の時間、斜線は前後加速度  $a_x$  の負の限界である。最小速度が小さくなる程最大前後加速度が負に大きくなる。Fig. 6.5(c)に  $T_3$  とフレア操舵後得られる応答の最小速度の関係を示す。  $T_3$  が小さい程最小速度は小さくなる。また、2段階操作で  $T_2$  が大きい程、最小速度は大きくなる。

Fig. 6.6 にフレアの条件を満足する時間  $t_f$  と  $T_3$  の関係を示す。ここで、図中の斜線はパイロットの反応時間の限界 ( $t_f > 0.25$ ) である。フレアの条件を満足する時間が長い程、パイロットの着地に対する余裕が生まれるため、これからフレアの条件を満足する最適なフレア操作を検討すると、次のようになる。  $T_3$  が小さいと最小速度は小さくなるが、最大頭上げは大きくなり、また最大前後加速度は負に大きくなる。更に  $t_f$  も小さくなる。  $T_3$  を大きくすると、最大頭上げ、最大負の前後加速度の条件は満足するが、最小速度は大きくなる。更に  $t_f$  は一度最大値に達した後小さくなる。これらの事から、

早すぎもしない、遅すぎもしない最適な  $T_3$  が存在する。この最適な  $T_3$  の値は、2段階操作では1段階操作より小さい方に変化し、更に  $T_2$  が大きくなると最適な  $T_3$  は小さくなる。したがって、  $t_f$  が最大になる引き方は、2段階操作で  $T_1=1$ ,  $T_2=1$ ,  $T_3=0.8$  であり、最適な引き方と言える。

また、フレアの条件を満足する領域内でフレア操作を開始しても、反応時間分の操作遅れがあるため、それより小さな  $t_f$  ではフレアの条件を満足しない。

### 6.2 トリム速度による影響

Fig. 6.7 にコントロールラインを0.4m引いてトリム速度を約7.2m/sにした状態からフレア操作した時の時間応答を示す。ここで、前節から、1段階操作の3秒間に1m引いたものがフレアの条件を満足する良好なフレア操作であったため、これと比較するために、これと同じ変化率のフレア操作を用いる。

Fig. 6.1(b)と比較すると、トリム速度が遅くなることにより、姿勢角と前後加速度の振動は小さくなり、最大

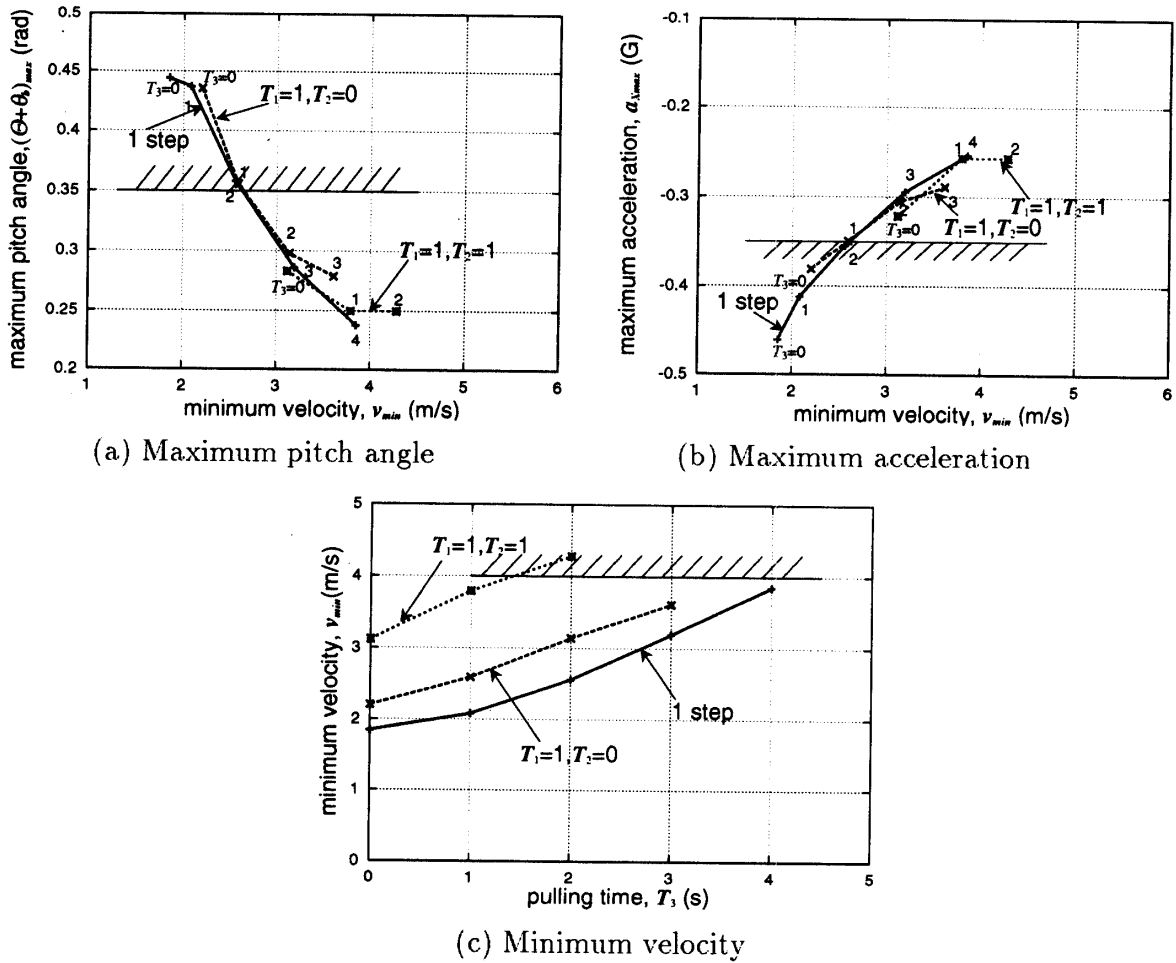


Fig. 6.5 Flare condition for various methods.

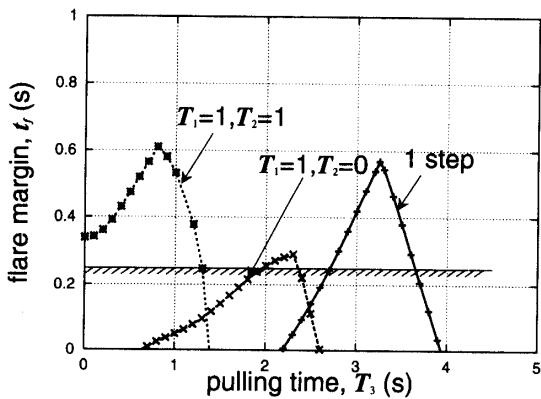


Fig. 6.6 Times for satisfying flare conditions.

頭上げ、最大負の前後加速度の条件は満足するが、速度の減少は小さく、速度の条件を満足しない。このことは、トリム速度が遅くなることにより、ボディとキャノピの慣性力とフレアによって生じる空気力の増加が小さくなるため、ボディが前に振り出される振子運動が小さくなる。故に十分な速度減少が得られないと考えられる。したがって、フレアの条件は満足しない。即ち、トリム速

度が遅い状態で、巡航速度時と同じフレア操作を行うと、速度の減少が小さくなり、フレアの条件を満足しなくなる。

### 6.3 舵の効きによる影響

Fig. 6.8 に、本研究モデルに対して舵の効きを 0.5, 0.75, 1.25, 1.5 倍し、フレアの条件を満足する時間  $t_f$  と操舵時間  $T_3$  の関係を示す。なお図中の normal は通常の舵の効きで、飛行実験データのものである<sup>5)</sup>。ここで、フレア操作は 1 段階操作で 1 m とする。舵の効きはパラグライダーの後縁部の折れ曲がる面積で決めることができる。即ち、折れ曲がる面積が大きいほど舵の効きは良くなる<sup>9,10)</sup>。1.25, 1.5 倍と舵の効きを良くすると、 $T_3$  が小さいと振子運動が大きくなるため、 $T_3$  を大きくした方がフレアの条件を満足するが、効きが良いために高度限界を満足せず、フレアの条件を満足する時間の範囲は本研究モデルより小さくなる。一方、0.75, 0.5 倍と舵の効きを悪くすると、0.75 倍では  $T_3$  を小さくした方がフレアの条件を満足し、フレアの条件を満足する時

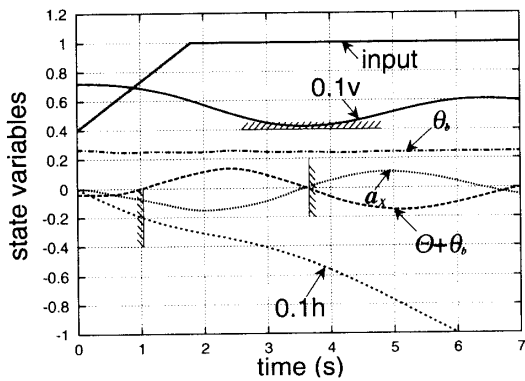


Fig. 6.7 1 step pulling of control lines at the velocity which is slower than nominal flight.

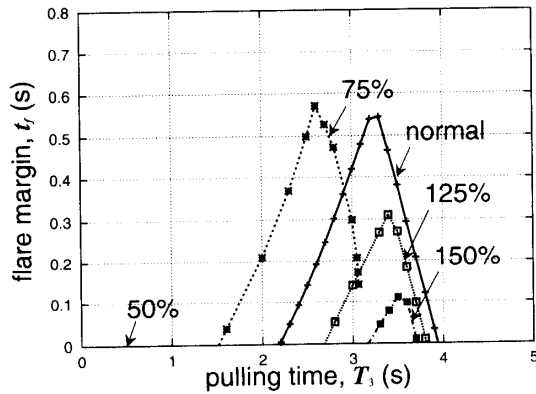


Fig. 6.8 Flare margin for input derivative variation at 1 step pulling.

間の範囲は本研究モデルと大差ない。しかし、0.5倍では舵の効きが悪すぎて速度限界を満足しなくなり、フレアの条件は満足しない。即ち舵の効きが良いとフレア操作はゆっくり行い、効きが悪いとフレア操作は早く行う必要があるが、舵の効きは良すぎても、フレアの条件を満足する時間は小さくなる。このことから、本研究モデルの舵の効きは最適に近いと考えられる。

## 7. まとめ

様々なフレア操作の計算を行うことにより、パラグライダーの運動を定量的に調べた。その結果、(1)フレア操作は急激に行うと速度の減少は大きい、状態量の振動も

大きくなる。そして、フレア操作が急激すぎる場合は、着地の姿勢が正でかつ操舵開始高度が2mである条件を満足しなくなる。フレア操作がゆっくり過ぎる場合は、十分な減速が得られない。したがって、Fig. 6.6より本研究モデルでは(2)フレアの条件を満足する中でも、1段階操作では  $T_3=3.3$  秒、2段階操作では  $T_1=1$ ,  $T_2=1$ ,  $T_3=0.8$  が最適な引き方である。また、(3)フレア前のトリム速度が遅いと、十分な減速が得られなくなるため、フレア前には十分速度を保っている必要がある。(4)舵の効きは効きが良いならば操作をゆっくり行い、効きが悪いならば操作を早く行う必要があるが、舵の効きは良すぎても悪すぎても、フレアの条件を満足する時間は小さくなる。本研究モデルの舵の効きは適切であることがわかった。

## 参考文献

- 1) John D. Nicolaidis and Michael A. Tragarz: Parafoil flight performance, AD-731143, AFFDL-TR-71-38, June (1971).
- 2) 中台章他: パラグライダー教程, スキージャーナル株式会社 (1993).
- 3) Alex G. Sim, James E. Murray and David C. Neufeld: Development and Flight Test of a Deployable Precision Landing System, Journal of Aircraft Vol. 31, No.5, Sept-Oct. (1994) pp. 1101-1108.
- 4) Akira Azuma: Flight Dynamics of Paraglider, Lecture note, University of Tokyo (1994).
- 5) 可撓翼実験部会: パラグライダー飛行実験報告書第二報, 全国スカイレジャー振興協議会 (1996).
- 6) 東昭: パラグライダーの特性, JASPA, 日本航空協会 (1996).
- 7) D. E. Goldman, H. E. Von Gierke 著 中村円生, 松野正徳, 長谷川武訳: 衝撃・振動の人体への影響, 医歯薬出版株式会社 (1968) pp. 61-65.
- 8) 井口雅一: 人間-機械系, 共立出版株式会社 (1970) pp. 15-30.
- 9) 東昭: 航空工学 (II), 裳華房 (1989).
- 10) Perkins, Courtland D. and Hage, Robert E.: Airplane Performance Stability and Control, John Wiley and Sons, New York (1949).