

女性用人力飛行機 “Chick-2000” の離着陸時における問題点の考察

Chick-2000 プロジェクトチーム

“アクティブギャルズ”

パイロット 堀 琴乃

代表 吉川俊明

OHP-1

“アクティブギャルズ”は、女性パイロットによる人力飛行機の旋回飛行を目指して活動している。我が国の女性パイロットによる人力飛行は、漸く3例を数えた。’92年に堀琴乃のFAIルールによる人力飛行に成功以来、’97年に村岡ちひろさんがそれを更新、昨年暮れに、Windnautsの隅川真由美さんが自力離陸に成功した。体力に劣る女性の人力飛行では、自力離陸が最大の難関である。爆発的なパワーと精密操縦が同時に要求される離陸に始まり、息も絶え絶え、酸欠寸前、疲労困憊での着陸は、まさに人力飛行の極限と言える。

野心作Chick-2000は、テストフライト着手時には様々な問題を提議したが、漸く安定した直線飛行が可能になった。“Chick-2000”のフライト経験を交え、人力飛行の離着陸性能や操縦に影響する要因について考え、対策方法を紹介する。

“Chick-2000”は、ランニングテストで墜落・大破を3回経験した。ランニングテストとは、我々のチームでテストフライト前に、フライトのリスク回避や安全性の確認、基本的な調整を行うテストのことを云う。

離着陸時に問題になり易い要因について考える。ここでは、離陸速度 地面効果 縦方向の安定性 着陸速度 の4項目を考える。

OHP-2

(1)離陸速度

離陸速度は、パイロットの操縦技術、出力パワー、全備重量や主翼の迎角、滑走路の平滑度や勾配等の路面状況、その他気象条件が影響する。

十分な速度が確保できずに離陸した時の問題に、

速する可能性が有る

操縦操作が極めて難しい

上昇率が確保できない(迎角が過大な場合や有効な地面効果域を越えた場合、上昇が困難になる = 投入パワーに釣り合う高度までしか上昇できない)

(2)地面効果

地面効果は、機体の高度がその翼幅より低くなった付近から著しく現れる。人力飛行機は地面効果の恩恵を受けながら飛んでいると考えて良い。

空力特性に与える影響として、

揚力係数が一定の時、翼による吹き上げ、吹き降ろし、翼端渦が減少

揚力特性曲線の勾配が増加し、同一迎角では揚力係数が増加

誘導抗力が減少

等が有る。

地面効果は、効果の無い時に比べると、

低速飛行できる

必要馬力が減少する

一定の揚力係数の維持には迎角を小さくしなければならない

OHP-3

ピッチ軸の釣り合いが変化する等の変化を生じる。

図に“CHick-2000”の地面効果を含めた有効アスペクト比と必要パワーの変化を示す。“CHick-2000”の主翼の高さは1.6mであるから、グラフで高度1.6mの所が離陸の瞬間の有効アスペクト比に成る。幾何学上のアスペクト比は43.7であるがその3.1倍の133.5と云う驚異的な値を示す。FAI記録で要求される高度2m越えの場合ですら、主翼の高さは3.6mであるので、有効アスペクト比は、本来の1.6倍の70.3に成る。これを必要パワーに置き換えると、離陸の瞬間では138.8w、高度2mの場合で164.1wに成る。

ちなみに“CHick-2000”の定常飛行時の必要パワーは、高度2~3mで、気圧や風向等、天候の影響によるマージンを見込んで180wに設定している。実際の離陸では、離陸速度まで短時間に加速しなければならない。我々の経験では30%増し、240w位の投入パワーで離陸するのが効率的と考えている。240wは堀琴乃のアネロビクスパワーの最大値に当たり、フルパワーペダリングでのスタートになる。鳥人間コンテストの高性能な男性の機体の定常飛行時のパワーとほぼ同じと考えて良い。

主翼の剛性が低い為に撓みの大きい翼は、その撓みの分だけ効果が減少する。例えば、2mも撓む主翼の場合は、“CHick-2000”で強烈な印象として実感できるほどの地面効果は感じられない。堀琴乃の場合なら離陸すら難しく成る。

OHP-4

(3) 縦方向の安定性

縦方向の安定性に関する要因は、

重心位置

風圧中心

静安定と動安定

が有る。

現象として、

急上昇・急降下

ピッチング

ヒュゴイド運動

PIO ; パイロット誘起振動

等が生じる。

ヒュゴイド運動やPIO は、機体の剛性も影響する。

OHP-5

(4) 着陸速度

着陸速度に関して、影響要因は離陸速度と同じである。

着陸速度より小さい速度で着陸した場合に生じやすい現象として、

失速する可能性が有る

操縦操作が極めて難しい

安全な着陸復行が行えない

等の問題が有る。

迎角一定のまま地面効果域に入ると、地面効果で揚力係数が増加し、必要パワーが小さくなる。結果、余剰パワーから機体が浮き上がる。地面効果域でパワーオフする時、速度が着陸速度より速過ぎると、バレーニングやフローティングが生じ、接地点が前方に伸びてしまう。

OHP-6

ここでビデオをご覧頂き、“CHick-2000”の事例を紹介する。はじめにランニングテストの様子を紹介し、続いてランニングテスト中に起きた事故を紹介する。

***** ビデオ (以下の説明を含めて4分30秒) *****

ランニングテストの様子である。

20~30mの走行テストに始まり、軽いジャンプ、高度数10cmの低空飛行テストを繰り返し、機体の基本的な調整、例えば、走行中の直進性の確認、効率よく離陸するタイミングの習得、舵の効き、重心位置、プロペラのピッチ調整等に及ぶ。

1回目の墜落です。原因は速度不足と地面効果の変化による失速である。離陸速度の不足と急上昇による地面効果の急速低下により、急激に機首上げモーメントが増大し、失速・墜落した。

2回目の墜落です。原因は1回目と同じである。失速直後に空中分解したが、これは失速直後に機首が急激に下向き、墜落回避の操作のフルアップによる頭上げモーメントが、非常に剛性の高いテールブームでエレベーターに敏感にレスポンスし、設計値の数倍の捻りモーメントが主翼のスパーを捻じ切った。

3回目の墜落です。PIOの顕著な例である。離陸後高度数10cmに達し、機体の縦の振動を安定させようとした時、ほんの数秒間の3~4回のピッチングで、修正舵と逆にピッチング運動が増幅し、振幅がアツと言う間に数倍に拡大、制御不能に陥り、墜落した。

***** ビデオ終了(以上の説明を含めて4分30秒) *****

3回の墜落は、速度不足と地面効果の変化、PIOの誘発が関連していたと考えられる。

問題点の考察と対策について述べる。

(1) 離陸速度

急上昇による速度低下に対し、適切な余裕を見込んだ速度の設定が大切である。獲得高度に対して必要な離陸速度のグラフを示す。力学的エネルギー保存の法則から求めた。右側の縦軸が、失速速度に対する安全率を表す。“CHick-2000”の失速速度は7.2m/sである。速度8.5(m/s)で離陸し、エネルギーロスなしで高度1mに上昇した時の速度は7.3(m/s)で失速寸前である。高度1mに上昇時で7.5(m/s)を確保するには、離陸速度を8.71(m/s)、高度2mの場合では9.77(m/s)が必要に成る。従って、**人力飛行機を安全に離陸させるには、少なくとも失速速度の120%以上の離陸速度が必要**と考えられる。

(2) 地面効果

迎角が大きい低速飛行中ほど誘導抗力が大きく、地面効果も大きくなる。従って、離着陸時に最大の影響が表れる。**定めた速度以下でのリフトオフは極めて危険**である。パイロットは、**地面効果で抗力が減少すると、離陸速度より小さい速度で離陸できる様に感じる。又、現実にリフト・オフ出来る。**しかし、**上昇により減速し、低速のまま地面効果の少ない高度に達すると、誘導抗力が増大し、上昇性能が大幅に低下する。**離陸速度以下でリフト・オフした場合は、**直ちに機首を押さえて、地上すれすれの高度を維持し、加速しなければならない。**高度の獲得が致命傷に繋がりがねない。換言すると、離陸後滑らかに高度を獲得するには、離陸速度を厳守したリフト・オフが重要と言うことである。

OHP-6

OHP-7

OHP-8

地面効果により著しくアスペクト比や必要パワーが変化するので、機体の釣り合いも大きく変化する。
吹き降ろしの減少が水平尾翼の有効迎角を増大し、尾翼の揚力増大による機首下げモーメントを生じる。

機首下げモーメントは高度の上昇に伴って減少する。

等の変化が生じる。

従って、**離着陸のような超低空飛行では、機首下げモーメントに抵抗する大きな上げ舵が必要**になる。
“Chick-2000”の場合、**3~4度のアップトリムに成る**。又、上昇に伴ってその上げ舵は緩めなければならない。

OHP-9

(3) ピッチング

ピッチングも要注意である。

ピッチ軸の静安定は、

重心位置と主翼の風圧中心

主翼面積と尾翼面積

テールモーメントアーム

で決定される。

特に重心位置と主翼の風圧中心に関して、**人力飛行機は必要パワーの低減に、水平尾翼のネガティブリフトを最小にする目的で、重心位置を空力中心付近まで後退させる**ことに問題がある。

経験的には、大きな尾翼容積の確保で定常飛行を解決しているが、離陸時には十分な注意が必要である。速度不足で上昇すると、離陸に大きな迎角が必要に成り、機体は頭上げモーメントを発生する。この時の問題点に、水平尾翼は、レイノルズ数が主翼の半分位しかない事や、主翼の洗流域に入って有効に機能してくれない事がある。更に、主翼の迎角増大に伴って、ダウンウオッシュが大きくなり、水平尾翼の有効迎角が減少する。これらの悪条件が重なって、頭上げモーメントに対する抵抗モーメントが不足する。

風圧中心が重心位置より前方に移動すると、ネガティブリフトを使った水平尾翼による通常の吊り合いが**揚力尾翼の吊り合いに変化する**。僅かにダウントリムで釣り合っていたものが、突然、アップトリムでないと釣り合いが保てなくなる。これではパイロットはたまったものではない。釣り合いが揚力尾翼の釣り合いに変化すると、機体のセッティングにもよるが、**地面効果の大きい高度では、エレベーターが3~4度アップトリムに変化する**。それに気づかないと、**離陸しようとアップを操舵した瞬間に、急上昇やピッチアップに陥ってしまいかねない**。ビデオの2番目の墜落がその例である。

OHP-10

OHP-11

対策として、

重心位置の後方限界を離陸時の風圧中心の移動位置より前に設定する。

スタビライザー付きの尾翼に比べて、低速時に少ない舵角と抵抗で姿勢制御し易い可動尾翼（フライングテール）を装備する。

離陸速度を上げる

等が有効である。

離陸速度を上げると低迎角で飛行することになる。それにより風圧中心は後方に移動し、機体は頭下げのモーメントを生じるので、急上昇やピッチアップの防止に繋がる。

OHP-12

以上を纏める。

我が国の女性パイロットによる人力飛行は、まだまだ自力離陸で精一杯の状況である。まず安全に離着陸できる技術を獲得・蓄積しなければならない。今回は、“Chick-2000”を具体例に、人力飛行機の離

着陸時の問題点について考察し、対策例を紹介した。数年前から男性なら誰でも飛べる時代に入り、パイロットは男性に偏りがちである。今後の女性パイロットの進出、機体設計やフライト技術向上の一助になる事を期待する。

尚、フライトトレーニングは、堀琴の場合はシミュレーターを使ったトレーニングが大きな効果上げた。練士研チャレンジチームに開発して頂いた“Chick-2000”専用のフライトシミュレーター、‘Bird for Chick-2000’は、“[アクティブギャルズ](#)”のホームページで公開している。どうぞご利用ください。

< 参 考 >

地面効果

着陸の場合、飛行機が迎角一定のまま地面効果の発生する領域に入ると、揚力係数が増加して必要推力が小さくなり、この結果、余分な推力から飛行機自体が浮き上がることになる。着陸は抗力が減少する地面効果の発生する領域でのパワーオフとするので、飛行機が返し操作開始時に余分な速度があったとすればフローティング（浮き上がり現象）が生じ、接地点が大きく前方に伸びる。

地面効果の影響

地面近くでは、吹き降ろしの減少で水平尾翼の迎角が増したことになり、尾翼の揚力が増大し、[機首下げモーメント](#)が生じる。

[迎角を一定に保持](#)していたとすれば、実質的に揚力係数は大きくなる。安定性が低下し、[機首上げモーメント](#)が発生する。

地表面又は地面に近いところでは、高いところでの飛行速度より少し遅い速度で水平飛行することが出来る。

翼を揚力係数（Cl）一定の状態のまま地表面に近づければ、翼による吹き上げ、吹き降ろし、翼端渦のいずれもが影響を受け、減少する。

バレーニング (Ballooning)

着陸時の引き起こし操作を行ったとき、地面効果の影響で急激に降下率が低下し、機体が接地しないで滑走路すれすれを飛行したり、過剰な揚力や地面の反力で再上昇し、地面を風船が跳ねるような運動を起こして着陸距離が伸びる現象。

着陸接地直前・直後で、引き起こし操作が早すぎたり、遅すぎたり、過大になった場合に起こりやすい。車輪と重心位置の関係にも注意が必要。

ポーポイズ (Porpoise)

着陸時に、滑走路上で何度もバウンドを繰り返すこと。接地時の降下率が過大な場合、着陸装置の緩衝が不十分な場合、接地直後の操舵が適当でない場合などに発生しやすい。イルカが海面上を跳ねるような、接地と縦揺れを繰り返す状態を言う。

ピッチング (Pitching)

機体が、前後軸の周りに回転する運動。

前後軸について不安定な機体の場合、機首が一度上下運動をはじめるとますます大きくなり、急激な上昇姿勢となって失速したり、急激なダイブに入ることが有る。

フライングテール (可動尾翼) の装備

離着陸の速度不足時に効果を発揮する。空力舵面でも、スタビライザー付きの尾翼は、速度不足時の姿勢制御に大きな舵角を必要とし、抗力が増大しやすく、むしろ機速の低下を招く事すらある。比べて

フライングテールは、小さな舵角と抵抗で微妙な姿勢制御が行いやすい。前者が空気抵抗で制御するのに対して、後者は揚力変化で制御する。高効率を望むなら工作精度も高いものが要求される。面積も小型で済むため軽量化に貢献する。舵圧を感じにくいので、ニュートラルを掴みにくい欠点がある。

密度高度

気圧高度に対して、温度を修正した高度。航空機の性能は密度高度を基準に表示されている。特に、離着陸性能を求める場合、密度高度に注意が必要。例えば、標高の高い飛行場から離陸するときは、適度にスロットルをリーンにすることによって最良の出力を得ることが出来る。

鳥コンの場合の気圧配置に応じたプロペラピッチの調整等・・・

縦の動安定

動安定とは釣り合い状態が破れた後の運動を考えること。

動安定が正であれば（少なくとも静安定が正である前提がいる）、最終的には元の姿勢に戻るが、この戻り方には飛行機によって2つの型がある。すなわち長周期型と短周期型であり、このうち短周期型の方が縦の動安定の度合いは大きいと言える。

元に戻る傾向を生じるのは動揺に対する減衰モーメント（Damping Moment）が機体に生じるからである。すなわち飛行機の縦揺れの運動は機体のY軸周りの角運動であって、減衰モーメントとはこの飛行機の前進に伴って生じる抗力と同様に、角運動に対する一種の抵抗と考えられる。

この減衰モーメントは、その大部分が水平尾翼によって生じる空気力である。また、この減衰モーメントの大小は水平尾翼の面積が大きいほど、或いは水平尾翼面積が小さくとも重心位置から水平尾翼までの距離が長いほど大きくなる。

程度の差は有っても飛行機の縦運動は、減衰の遅い長周期運動と減衰の速い短周期運動の合成されたものである。

長周期振動（ヒュゴイド）

- ・1回の周期に要する時間が10秒を越える・動揺は長い周期で減衰が遅い
- ・パイロットがこれをコントロールするのは可能
- ・ヒュゴイドは、迎角が一定の状態でも速度の増減が発生する
- ・ヒュゴイドは、比較的静的に安定な飛行機について良く見られ、トリム特性に大きく影響する。

短周期振動

短周期振動は、飛行機が速度が変化していないのに迎え角が変化する現象で、操縦翼面の振動周期が速すぎて機体がこれに追従しきれないためによく発生する。耐空性の要件では、速やかに減衰することを求めている。超過禁止速度付近でピッチ、ロール、ヨーの各操縦翼面に人為的に振動を発生させてこれを調査しなければならないことになっている。

- ・1回の周期に要する時間が1~2秒
- ・動揺は短い周期で急速に減衰する
- ・パイロットがこれをコントロールするのは非常に困難
- ・パイロットの操縦操作の周期と一致しやすく、振動を増幅する現象を引き起こす。
- ・短周期振動は、機体の速度が変化していないのに迎え角が変化する現象

ヒュゴイド運動

水平飛行中に、エンジン出力一定で急激に操縦桿を引いた後手を離すと、機体はゆっくり上昇しながら

ら速度が低下する。速度低下によって揚力が減少すると、機体は降下しながら再び速度を増す。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、飛行機が波状曲線の頂上に位置するときは位置エネルギーが最も大きく、速度が遅い。波状曲線の谷に位置すると位置エネルギーは運動エネルギーに変換されるので速度が増大する。速度増加が揚力を増大させ飛行機は再び上昇する。上下に振動する飛び方で、基本的には操縦装置の操作時間と同一時間間隔で起こる飛行機の運動によって発生する。

機首が上がると機体は上昇し、速度は落ちる。パイロットは昇降舵を操作して機首を下げる。すると機体は降下し、今度は速度が上がって再び機体は上昇する。この動きは、パイロットが機首を下げる操作を行いつつ振動の感覚が4秒以下のヒュゴイド運動は、実際には人力飛行機だけにしか起きない。通常の飛行機の場合は、この感覚が10秒或いはそれ以上になり、パイロットが自身で打ち消すことが出来る。

- 【特徴】 長周期運動の周期が短いために、打ち消せない、減衰しにくい。
迎え角はほぼ一定であるが、飛行高度や飛行速度が大きく変化する。

縦方向の操縦の注意点

縦方向の操縦の注意点でヒュゴイド運動を起こさない様にすることが有る。上下に振動する飛び方で、基本的には操縦装置を操作時間と同じ時間間隔で起こる飛行機の運動によって発生する。

1960年～70年代の人力飛行機にも幾つかの事例がある。

キース・シャーウィン著の“鳥のように飛ぶ”には、以下の如く報告されている。

昇降舵の操縦が難しい人力飛行機では、ヒュゴイド運動はもっとひどくなる。サムパック号とジュピター号で経験されたことだが、両機ともフライングテールを備えていたからである。パフィン号の飛行でもしばしば起きた。パイロットが期待を一定の資性で水平に保とうとすると生じた。だが、対気速度計によって一定の速度を維持して飛べば、ヒュゴイド運動は起こさなくなった。

程度の差は有っても飛行機の縦運動は、減衰の遅い長周期運動と減衰の速い短周期運動の合成されたものである。

一連の振動の感覚が4秒以下のヒュゴイド運動は、実際には人力飛行機だけにしか起きない。通常の飛行機の場合は、この感覚が10秒或いはそれ以上になり、パイロットが自身で打ち消すことが出来る。

その他

- ・ 離陸時の加速度を最大にする為に各種のテクニックを用いる。
低迎角で増速し、離陸直前に迎角を大きくする・ローブドライブ等
- ・ ペダリングで得られる推力は加速度を作る力であり、離陸距離を最小にするには、最大推力が得られる方法を用いなければならない。
- ・ 或る特定のリフト・オフ速度で最小離陸距離を確保するには、機体に作用する力によって離陸滑走中に得られる加速度を最大にすれば良い
- ・ 離着陸時；大舵 釣りが合いが不安定 (CP が移動しやすい)
- ・ 機体の剛性；機体は剛体ではなく、振動を吸収する
- ・ 迎角の変化による風圧中心の移動は、その翼型に固有の不安定要因を作り出す。