

## The First Few Seconds

- 最初の数秒間 -

著者 P. J. Goulthorpe  
出典 Sailplane & Gliding  
訳 津久井潤

### 【紹介】

昨年6月発行のP. J. Goulthorpeの寄稿(P.140)には、ウインチ曳航中のグライダー特性がシンプルな理論で説明されていた。ウインチ発航で最大の獲得高度を引き出すためには、可能な限り素早く上昇姿勢に入れることが必要である。そのため、本文では、ウインチ曳航の初期、つまり「最初の数秒間」の物理的限界に注目している。もちろん良好な曳航は限界で飛ぶこと以上に重要であり、インストラクタが主張するように、安全とエアマンシップがさらに必要である。しかしながら、グライダーで何ができて、何ができなくて、それはなぜなのかを最初の段階で明らかにしておくことは大切である。

-----  
曳航順を待っているのは年をとってしまうかのように長く感じるものです。しかし順番が回って来て、ひとたび「準備よし！」の聲がかかれば、物事はあっという間に進んでしまうものです。

精神的な準備が少々必要です。そのために、発航点で出発してからウインチ曳航で上昇姿勢を確立するまでの間の数秒間にグライダーに何が起こるかについての幾つかの考察をこれからお話しします。

### 【狙い】

曳航の初期フェーズ(図1a)の目的は、できるだけ早く安全に、狙った速度で意図する上昇角に入れることです。「最高の離脱高度を獲得するには、必要以上に索が巻き取られる前に上昇角を確立する」ということを力説したいと思います。一方で「地面近くでの急上昇は索切れあるいは失速のリスクを高める」という危険についても述べたいと思います。

### 【制限】

グライダーの飛行規定には、以下の2つの制限が記載されています。

- ・ レリーズにかかる最大張力(ヒューズとしてのウイークリンクの破断荷重)
- ・ 最大ウインチ曳航速度

### 【地上滑走】

離陸前の加速は全てウインチオペレータによって制御されます。索の速度は、グライダーを危険に陥れたり、グライダーが索を追い越したり、ウイークリンクを破断したりしないように、スムー

ズかつ徐々に加速させてゆく必要があります。

地上滑走中の加速はおよそ 0.5G であり、グライダーの重量の半分に加え地上滑走中の抵抗に打ち勝つだけの張力が必要ですが、そのトータルの張力はウイークリンク破断荷重内に抑えます。その加速度で速度を増加させてゆくと、グライダーは4秒以内、地上滑走距離にして150ft以内で離陸速度に達します。もし、向かい風の中であれば、もっと早くもっと短い距離で離陸します。

この段階では、索は地上を滑っていて、その重量は地面が支えています。索の張力は、グライダーの下方、重心の下の作用点（訳者注：リリース位置）で水平方向に働きます。そのために、グライダーの慣性によって機首上げのモーメントが発生します。もし、パイロットがこれを認識していなければ、離陸速度に達するや否や過度の機首上げが起こります（図2 a）。

重心が高いグライダー（例えば高翼機で座席が直立している K-8 のようなタイプ）では、この機首上げのモーメントが特に強くなります。地上滑走中の加速が適切でなければ、離陸時に、操縦桿をダウン一杯に倒してコントロールできる以上の機首上げが起こってしまい、グライダーは非常に速く上昇姿勢に移ります。幸いにも索の張力はそのうち重心の近くを通り、不必要な機首上げモーメントを減らし、そしてグライダーはコントロールを取り戻します。

発航点でテールを上げて出発を待っている、機首に車輪やスキッドのついているグライダーでは、地上滑走中の急激な加速によってテールを地面に強烈に打ちつけることとなります。そのことでパイロットは狼狽しますし、機体をいためるのも明らかです。

そのためにウインチオペレータは、グライダーが離陸するまで索の加速に常に気を配らなければなりません。この段階では、索が地面を擦って、抵抗になっていることが幸いしています。離陸後ウインチオペレータは、曳航の最初の段階に適切と判断する索速度を、一定に保つように努めてください。

### 【機首上げ】

ウインチオペレータが索の速度を一定に保った状態で、今度は離陸後の加速度のコントロールをパイロットが担います。パイロットがグライダーを上昇姿勢に入れて行くと、速度が増加してゆきます。さらに姿勢角が深くなるにつれてその影響はより顕著になります。上昇が非常に急角度であれば、姿勢のわずかな変化が大きな速度の変化をもたらします（図1 c）。そのために、上昇角が深くなればなるほど、機首上げによってグライダーの速度がより速くなるのです。

短い機首上げの間、索はおよそ水平です。つまり、グライダーの速度の水平成分は変化せず、一定の索の速度+向かい風の速度に等しくなります。速度の全ての増加分は垂直方向に発生します。よって機首上げ中、グライダーの加速度の全ては垂直方向に発生します。垂直加速度の影響はグライダーの重量を増加させます。例えば、垂直方向の 0.5G は、グライダーの重量をその半分程増加させます。

さて曳航中のあらゆる点で、グライダーに働く3つの力、つまり重量、索張力、揚力がバランスして釣り合いの三角形を形作ります。重量は垂直下方に働きますし、（曳航初期では）索張力は水平に、揚力は（いつでもそうですが）飛行経路に垂直に働きます（図1 b）。よって、飛行経路

が深くなる程、釣り合いの三角形はその形を変え、索張力と揚力が重量とともに増えてゆきます。つまり、垂直加速度で重量が増えれば、同じ比率で索張力と揚力も増えるということです（図 1 c）。

よって機首上げの間、索張力は、上昇角の増加に伴って増えるだけでなく、加速度それ自体によってもさらに増加します（同様に同じことが揚力や翼面荷重にも起こります）。グライダーが機首上げし、姿勢が深くなる程、索張力は急速に大きくなり、機首上げのレートに敏感になります。

ですから、急激な機首上げは索に過大な荷重をかけ、過度な索張力がかからないような上昇姿勢においても、索もしくはウイークリンクを破断してしまう可能性があります。曳航中の最もクリティカルな瞬間は、初期の上昇姿勢を確立させて、姿勢が最も深くなった時になります。このポイントが近づくにつれて機首上げのレートを減らしてゆくのが最良の方法です。

一方、離陸の直後まだ索張力や揚力が小さく、機首上げがさほど加速度を発生させない時に、適切に機首上げ速度を増加させることが大切です。つまり、早い段階で素早い機種上げを行うスキージャンプ型のプロファイルが良いお手本になります（図 1 d）。

索張力が重心を通るようになるにつれ（図 2 a、b）機首上げの間発生するトリムの変化は、偶然にも自然にそのスキージャンプ型のプロファイルを取るようになります。パイロットに解りやすいように言えば、最初はず早くピッチアップさせるが、上昇姿勢が確立するにつれ、その回転速度を小さくしてゆく、ということです。初期の機首上げにためらって、その後高度と速度が増えるにつれ機首を上げてゆくというのは、最良の方法ではありません。もし、確立しようとしている姿勢角が深ければ、ウイークリンクを破断する可能性が非常に高くなります。

曳航の初期フェーズの終わりでは、索切れが良く起こります。索切れが起こった時、急速なピッチアップやガストによる抵抗の増加が原因であると、しばしば思われがちです。でも、そのような状況下の現代のグライダーでは抵抗が重量の 5% を超えるようなことはあまり考えられません。それらに起因する加速によって引き起こされる力がより大きくなったり、事故の原因となる可能性が大きくなったりする、ということはありませんが。対処法は機首上げのレートを、特に後半適度に抑えること、そしてもしうまく行かなかったら、浅い角度で上昇姿勢にエントリすることです。

### 【一例】

ここまで述べてきたことを、幾つかの例で見てください。離陸直後で 45kt の水平飛行をしているグライダーを想像してみてください。パイロットが 45 度、つまりウイークリンクの限界となる角度で上昇姿勢を確立しようとしていると仮定します。グライダーが 45 度の姿勢に向かって機首上げしてゆくにつれ、垂直方向の速度は水平方向の速度、つまり 45kt に等しくなります。ですから、機首上げが、（例えば）4.5 秒で完了するとすれば、グライダーは平均的に 10kts/s、あるいは 0.5g を少し超える加速度を得ることになります。これは、グライダーの重量を増加させ、よって索張力と揚力を 50% 増加させることになります。

しかしそれは単なる平均で、加速度がポイントポイントでどのように変化するのはパイロッ

トが機首上げを行う時の飛行経路の形に依存します。急に曲がるものから徐々に変化するものまで、たくさんの取りうる飛行経路があります。しかし明らかに、45度の姿勢が近づくとつれ、0.5gの加速度は支えられなくなってきます、それは、45度の点で50%の荷重増にウイークリンクが耐えられないからです。ですから、機首上げのレートは45度付近で減らさなければなりませんし、平均レートを維持するために、50%以上の荷重増に耐えられる程索張力が十分小さい初期の段階で、速いレートを使って機首上げをしなければなりません。

図3に示すように、初期で20度/s、終端で4度/sの機首上げは、4.5秒でうまく45度の姿勢に入れることができます。この形こそが、スキージャンプと呼ばれる飛行経路の形です。

機首上げ中にグライダーにかかる索張力を重量に対する係数で表すと図4のようになります。ここで、スキージャンプ型プロファイルと10度/sの一定のレートで機首上げするプロファイルとを比較しています。どちらも4.5秒で45度の姿勢に入れることを目標にしていますが、スキージャンプの方がうまく行き、もう一つの方はウイークリンクが破断しています。

図4では索の重さ・抵抗も、グライダーの抵抗も考慮していません。よって、実際の索張力はもう少し大きくなるものと思います。もう一つ気になるのは、索張力の変化が速いと、ウインチオペレータは索速度を一定に保つことができなくなるかもしれないということです。しかし、そのような変化は垂直方向の45kt増と比較して小さいので、図4はあらゆる点から見て正しいものです。グライダーが45度に近づいた時、索張力の急激な減少が起こります。これはパイロットが姿勢の確立を確認して直ぐに加速を止めるからです。ただし、実際にはそれほど急ではなく、ピークが鈍るような操作がなされるでしょう。しかしそのことで、図4の有効性が失われることはありません。

#### 【失速】

離陸直後速度が小さい時に急速に機首上げを行うスキージャンププロファイルには、グライダーが失速するリスクがあります。その失速は、ほとんどのグライダーが通常飛行中に遭遇する失速のような緩やかな機首下げの形態を取らないため、非常に危険な状況に陥る可能性があります。今まで紹介してきたような、初期の機首上げの間に起こる索張力や運動による荷重増加の環境下で、失速したグライダーは操縦可能な状態から、あっという間に逸脱します。実際BGAでは、これらの状況下で起きた破局的な事故について、過去に報告をしたことがあります。

リスクは機首上げ中の必要揚力から計算できます。通常の滑空では揚力はほとんど重量と同じですが、必要揚力が通常の重量よりも大きな機首上げ中の各ポイントでは、失速速度は増加します。前掲の一例では、グライダーは、速度が45ktのとき20度/sのレートで機首上げを開始していました。このとき、垂直加速度が0.82gと計算できます。もし、通常の失速速度が33ktであった時、機首上げ中の失速速度は、45ktに近くなります。要するに、失速間際ということで、20度/sという機種上げレートはこのような環境下では限界ということです。

一つの例だけによる解説は、もちろん一般性を持ちません。しかし、機首上げが十分速ければ、ピッチアップ中にグライダーが失速する可能性が、どんなケースにおいても存在するという事は、

言えると思います。失速を防ぐ手段として、機首上げの前にはグライダーが通常の失速速度よりも十分速く飛んでいることを確認し、機首上げレートを抑えるということが挙げられます。

一例で示した図からは、ピッチアップが速すぎる時、ウイークリンクは失速を防ぐ手段にはなり得ないことが読み取れます。20度/sのレートは、索張力がウイークリンク破断限界の十分下にある時に、機首上げ中早い段階で失速を起こします。機首上げが進み速度が増加するにつれ、ウイークリンク破断のリスクは増加しますが、失速は起こりにくくなります。しかしながら、機首上げ操作に失敗すれば、失速はいつでも起こりえます。ここでの経験に則した結論は、索切れは失速より頻繁に起こるが、失速も時々起こりしかもウイークリンクが破断しない内に破局へと向かう、ということです。

#### 【離脱高度に対する影響】

冒頭で述べたように、機首上げをより速く行う程、上昇に使える索が長くなって離脱高度が高くなる、ということは事実です。しかし、急激な上昇は索切れもしくは失速のリスクがあることもまた明らかです。ですから、機首上げの速度と離脱高度のトレードオフを実施することは価値のあることです。

初期フェーズが1秒遅れると仮定してみましょう。もし、索速度が45kt (76ft/s) で一定に保たれているとすると、概念的発航点の差異（そして結果として上昇に使える索の長さの違い）は76ft/sの速度で1秒分、すなわち、76ftになります（あるいは、パイロットの機首上げのスタイルにも依るので、もう少し短いかもしれませんが）。意図した上昇角は45度だったので、最終的に獲得できる高度はだいたい索の長さの半分になります。つまり機首上げを完了させるまでの1秒の遅れで、38ft離脱高度が下がることになります。もし向かい風があれば、索速度と1秒あたりの離脱高度減少は少なくなります。

上昇姿勢を確立するにつれ、グライダーに働く荷重は機首上げのレートに非常に敏感になります。多くのパイロットは、機首上げを2、3秒スローダウンすることを選択し、また最終的な獲得高度から80ft程（向かい風があればもっと少ない）犠牲にすることでクリティカルな初期フェーズの安全性を高めようと決心するかも知れません。

ここで使った図は汎用的ではありませんが、特殊でもありません。異なるパイロットの機首上げレートを計測したり、どのレートが適切なのかについての見解をまとめたりすることは、役に立つものです。しかし、多くのことが上昇姿勢の深さと操舵のプロファイルに依存することに注意しなければなりません。すなわち、計測されるオ - バールな時間はこれらの特徴をうまく表現できないということです。

外から見ている人にとって、機首上げがどのように見えるかを表したのが図5で、無風状態での20度/s~4度/sのスキージャンププロファイルと、10度/s一定のプロファイルとを比較しています。どちらも4.5秒で45度の上昇姿勢を狙っており、索速度は45kt一定です。それらは、異なった高度で前に進んでゆきます。スキージャンプの方がアグレッシブに見えますが、ウイークリンクが破断するのはもう一方の一定プロファイルの方になります。これは、上昇角が深

くなっても機首上げのレートを十分に減らしていないからです。

しかし、機首上げのレートがそれほど重要なのは、最大上昇角で曳航されるときだけです。図4に示したように、(多くのクラブで使われている)35度程度の曳航では、索張力はどちらの例でもほとんど同じで、どちらもウイークリンクは破断しません。おそらく、その状況では、どの技法がより優れているかといった評価には至らないと思われます。

### 【風】

向かい風は曳航に有利です。なぜなら、索速度が小さくてすみますし、地上滑走中や機首上げ中に巻き取られる索が短いため、上昇に利用できる索がより長くなるからです(そして結果として獲得高度が高くなります)。

パイロットにとって地上滑走が短い時間と距離ですむことは明らかですが、一旦離陸すると、機首上げと上昇のためのテクニックは、向かい風があるからといって変化しません。パイロットは向かい風が有る無しに関わらず同じような姿勢と速度で飛行します。垂直の加速度と力も変わりません。外から見ている人にとっては、いつもと違って向かい風によって距離が短縮された分、機首上げが急に見えるかもしれませんが。

しかし、強風のコンディションはしばしばガスティブで、上昇姿勢へのエントリがうまくコントロールできないこともあります。よって、静穏なコンディションのときのウイークリンク限界よりも、上昇角は浅くした方が良いかもしれません。クロスウインドの状況では曳航角度に対しガストによる制限を付けることになり、最大の獲得高度が得られず、クロスウインドは曳航性能に悪影響を与えます。

### 【まとめ】

ウインチ曳航で最大獲得高度を得るには、ウイークリンクが耐えうる範囲で初期上昇を深く、そしてなるべく速く深くする必要があります。しかし上昇姿勢への機首上げはグライダーを上向きに加速しますので、重量を増やす効果が現れます。結果として、機首上げ中に索張力と翼面荷重が相似的に増加してゆきます。その効果は、上昇角が深い程影響が大きく、機首上げのレートは上昇姿勢のリミットが近づいたらレートを0に近づける必要があります。さもなければウイークリンクが破断します。このことは、素早い機首上げが初期に行われるスキージャンプ型は操作の良いお手本であることを示唆しています。しかし、急速な機首上げで失速させないよう注意が必要です。