

人力飛行のペダリングに関する考察

CHicK-2000 プロジェクトチーム “アクティブギャルズ”

吉川俊明((株)浅沼組)

名古屋大学 Aircraft 佐多宏太、大谷和弥

人力飛行のペダリングに関する問題について述べる。ペダリングのスキルはフライトを左右する大きな要因になる。中でも、特に、滞空時間が支配されると云える。

人力飛行は、人が航空機のパイロットとエンジンの二役を務める。この内のエンジンの部分に、人力特有の問題が隠れている。通常、人力飛行機のパワーの抽出は、自転車漕ぎ式のペダリングが採用される。この手法は、日常生活で慣れ親しんだ姿勢であるが、押し漕ぎに頼っているため、効率が良くない。一方、自転車競技では効率の改善に、押し漕ぎに加えて、トゥクリップや競技用シューズを用いた引き足を有効に活用するペダリングが工夫されている。人力飛行機でもそのシューズを利用している。

私達のチームでは、押し漕ぎと引き足を組み合わせた滑らかなペダリングを、その掻き回すようなペダリングスキルから、ロータリーペダリングと呼んでいる。ロータリーペダリングは、高速回転、高出力、振動防止に有効である。ペダリングには、特異なスキルが必要で、10年に及ぶ絶え間無い練習が必要と云われる。スキルの習得に当たって克服しなければならない課題に脈動が有る。

OHP- 1

脈動の制御がフライトを左右するのは、それが、人体エンジンのエネルギー効率を始め、プロペラ効率や伝達効率、機体の飛行特性に影響するからである。

例えば、プロペラの設計に関して、現在のプロペラ設計は、アドキンスとリーベックの手法を基に、誘導速度場を最適化する方法が主流である。問題はこの設計法の適用で、そこには脈動が考慮されていない。つまり、性能計算のモデルでは、後流渦が一定速度で流れる仮定のもとに誘導速度などを考えているが、ペダリングに脈動が有ると、後流渦面が伸縮し、過程からかけ離れてしまう。脈動を考慮しない設計の計算精度には意味がない。ちなみに、プロペラ効率は、脈動を考慮すると、ペダリングスキルにもよるが、5~10%低下すると考えている。

OHP- 2

動力の伝達効率に関しても、チェーン速度やプロペラシャフトの回転速度が一定で無いことによるロスが重要で、定量的評価の難しい問題である。

更に、既に30年以上前から指摘されている人力飛行機特有の制御問題で、ペダリングの脈動が、機体の固有振動数と相まってPI0の発生原因になる。いわゆるフゴイドモードの問題である。詳しくは、私達の昨年の発表と、この後の坂本の発表によるが、縦の振動を制御できなくなるということである。

以上のように、人体エンジンのエネルギー効率や、機械効率、制御性能の向上には脈動の実態把握と対策が重要である。これまで脈動の実態は明らかにされていなかった。今回私達はそれを実測して明らかにしたので、ここに紹介し、問題点について考察する。

脈動について簡単な例で比較する。人力飛行機と自転車を比較すると、人力飛行機では、回転中のプロペラの後に立つと、ペダリングの脈動を肌で感じられる。自分の前をプロペラブレードが通過した時とそうでない時である。風が来るか来ないかで、明らかにプロペラ後流の伸縮を感じる。一方、自転車に乗っていてペダリングの脈動を感じることはない。ペダルを押している時に自転車が加速し、そうでないときに減速していると感じない。これは、ペダリングの仕事の対象が違うからである。人力飛行機はプロペラを介して空気に仕事をする。自転車は、ワンウェイクラッチの働きをするフリーホイールを用いた車輪を介して地面に仕事をする。自転車の仕事の

OHP- 3

対象が接地抵抗の大きい地面に比べて、人力飛行機のプロペラは軽量化の観点や仕事の対象が抵抗の少ない空気であるので、ペダリングの応答が異なってくる。これらは**慣性モーメントに依存**する。

OHP- 3

脈動の原因について、**ペダリングのスキルに関して**、自転車ペダリングは通常は押漕ぎで、回転速度はペダルを押している時に加速し、それ以外は減速する。運動はピストンエンジンに似て、1 サイクル毎に上死点と下死点があり、加速度の変化が脈動を生じる。上死点と下死点では、回転速度とトルク、パワーがほぼ0になり、片足単気筒の2気筒エンジンの特徴がある。

OHP- 4

チェーンの振動に関して、人力飛行機の駆動系は軽量化を目的に、細いチェーンを用いる。チェーンの伸びは自転車の4倍に達し、軸間距離が広く90度捻って用いるチェーンに作用する加速度の変化がペダリングで発生した振動を増幅させる。振動の増幅については後で説明する。これには**ギヤ比の影響が無視出来ない**。**チェーンテンショナーの最適配置がポイント**である。

脈動の成分 について、ペダリングの脈動は、片足単気筒の2気筒エンジンによるものであるから、**速度とトルク**の2つの振動成分を持っている。

OHP- 5

脈動の影響には、1つ目に**チェーンの振動と張力の変化による伝達効率の低下**がある。これには、**速度とトルクの2つの成分**が関わっている。2つ目が、**プロペラ効率の低下**で、**プロペラの回転速度の脈動が、プロペラの後流渦面を伸縮させてプロペラ効率を低下**させる。これは速度成分の影響である。3つ目が、**機体の設計**に影響する。脈動が、プロペラシャフトの捻りモーメントを脈動させ、プロペラシャフトとブレードの設計に影響する。これは速度とトルクの成分が関わる。また、機体の振動、**リカンベントスタイルの機首のヨーイングやアップライトスタイルの機首のローリング**の発生は、コクピットフレームや主翼取り付け部の設計に影響する。これも速度とトルクの成分が関わってくる。4つ目が、**人体エンジンのエネルギー効率**で、実はこの話しの重要なポイントである。脈動は持続時間を著しく減少させる。つまり、パイロットが早い内にバテてしまって、フライト時間が短くなるということである。

OHP- 6

測定は、実機と同じレイアウトのフレームを製作し、計測装置を搭載して測定した。測定センサは、ペダル側にトルクを検出する歪ゲージとスプロケットの回転速度を検出する光電センサ、プロペラ側にチェーンを介してプロペラシャフトに伝達されたトルクと回転速度の測定に同様のセンサを適用した。**サンプリング間隔は1ms ; 1秒間に1000回**とした。詳細は、本シンポジウムの第2回講演集『人力飛行機の離陸滑走時の必要パワーの測定』、第3回講演集『人力飛行機のチェーン・ドライブ方式による動力伝達装置の伝達効率の測定』による。

OHP- 7

測定結果を説明する。

グラフにプッシュペダリングと書いている**押し漕ぎペダリング**には、離陸滑走時のフルパワーペダリングの測定データを引用した。**ロータリーペダリング**、引き足を併用したペダリングで、**フレーム停止状態**、90rpmのデータを引用した。

図-5はプッシュペダリングで、図5.1に停止時からペダリング開始後8秒間の加速状態を示す。図5.2~4には、1ストローク当たりの回転数、トルク、パワーの詳細を示す。図-6はロータリーペダリングで、図-5のプッシュペダリングに対応している。測定は、ペダル側のスプロケットとプロペラ側のスプロケットで行なった。図-5、6は、いずれもペダル側スプロケットのデータを示す。図-7はロータリーペダリングの測定結果で、ペダル側とプロペラシャフト側の両方の測定結果を比較している。

OHP- 8

グラフを説明して考察する。**回転数**に関して。プッシュペダリングに関して、図5.1からペダル1回転の脈動を抽出する。ペダル回転4回転目の5.23秒から6.43秒の部分について見る。拡大したものが図5.2である。1ストローク1.2秒間の平均回転数は53.1回転で、それに対して±

OHP- 8

17 回転； ±32%振動している。最低回転数は 36 回転で、最高は 70.2 回転である。次にロータリーペダリングを見る。ペダリング開始後の時間は、プッシュペダリングとほぼ同じ 5.31 秒から 5.95 秒の 1 ストロークを見る。この時の 1 ストローク 0.64 秒間の平均回転数は 96.3 回転で、それに対してプラス側で 4.8 回転、マイナス側で 8.3 回転、合計 14.2 回転； ±5%の振動している。最低回転数は 91.5 回転で、最高は 101.1 回転である。脈動率は、ロータリーペダリングがプッシュペダリングに対して、約 1/3 に減少している事が解る。

OHP- 8

トルクに関して。トルクは図 5.3 と 6.3 による。青が左足で赤が右足である。プッシュペダリングでもロータリーペダリングでも左右のトルクにばらつきは無い。左右が均等で、ロータリーペダリングのスキルに必要なバランスの良いトレーニングの結果である。プルのトルクの最小値は、プッシュペダリングでは 14.9Nm であるが、ロータリーペダリングでは -2.2Nm で、マイナスである。トルクのプラスマイナスは、ペダルを回転させる方向がプラスで、反対方向の力が作用した場合がマイナスになる。従って、片方の足のプッシュがプラスで、反対がマイナスの場合、その瞬間ではパイロットから見ると、瞬間的に両足がプッシュした状態になっていると考える。引き足については、プッシュペダリングの引き足時の変動率が小さい事が解る。しかし、ロータリーペダリングは、プッシュペダリングに比べて比較的綺麗なサインカーブを描いている。サインカーブの上下の比は、13~4Nm を中心に、プッシュの 3 に対して、プルが 1 くらいである。トルクの振動に関して、プッシュペダリングでは、1 ストロークの平均トルク 57.8 Nm に対して、±42.9 Nm； ±74%振動している。ロータリーペダリングでは、平均トルク 20.0 Nm に対して、±22.1 Nm； ±111%振動している。ロータリーペダリングの方が脈動率が大きい事が解る。トルクの最大値は、いずれも平均値の約 2.5 倍に達している。

OHP- 9

パワーに関して、パワーは回転数とトルクの積で求まる。トルク同様、青が左足、赤が右足で緑が左右の合計である。プッシュペダリングでは、1 ストロークの平均パワー 387W に対して ±315W； ±82%の振動に対して、ロータリーペダリングでは、平均パワー 244W に対して、±242W； ±99%振動している。最大値は、いずれも平均値の約 2 倍に達している。

これまでの回転数とトルクのグラフで、プッシュペダリングとロータリーペダリングのそれぞれの脈動率が解った。これからが本論になるが、パワーのグラフを見ると、プッシュペダリングの平均パワーは、緑のラインで表しているが、400~500W である。ロータリーペダリングでは 350~400W である。ペダリング手法の違いは有っても、出力パワーに大きな差はない。ところが、ピークパワーを比べると、プッシュペダリングでは 850W、ロータリーペダリングでは 550W である。同じパワーを出力する時、ペダリング手法の違い、言い換えると、ペダリングのスキルによって、ピークパワーは、850W に対して 550W と、6 割もの開きが生じている。これが、冒頭に述べた、ペダリングスキルがフライト時間を支配する理由である。ロータリーペダリングのスキルを習得していないと、アット云う間にパイロットがオールアウトになってしまう原因である。

OHP-10

以上を纏める。

駆動系の設計に関して、回転数の脈動は、ロータリーペダリングの場合、プラスマイナス 10%前後で、大きな安全率を見込む必要はない。トルクとパワーの脈動は、瞬間的に最大値が平均値の 2~2.5 倍に達するため注意が必要である。クルージングパワーの 3 倍に対して安全率を考慮する必要が有る。

具体的には、我々の CHick-2000 のクルージングパワーは約 160W であるが、自力離陸~上昇時の瞬間最大パワーは 1000W に達する。この時実際にプロペラに導入されるパワーは約 600W で、つまり伝達効率が 60%まで低下するということであるが、プロペラブレードの撓みをクルージング時でスパンの 1.5~2%に押さえ設計しているが、離陸の瞬間には 5%近い撓みが生じ、大きな効率低下を招いていると考えられる。

OHP-11

CHick-2000 のプロペラやプロペラシャフトの剛性が、鳥人間コンテストの男性の出場機に比べ

て、遙かに卓越していることが理解してもらえらると思う。

また、ペダリングスキルに関して、ロータリーペダリングでは、回転数は平滑化され、脈動のサインカーブは観察し難いと言える。これは引き足を使って掻き回すように漕ぐトレーニングの効果であるが、トルクとパワーには明確なサインカーブが観察されている。滑らかな原因に、ロータリーペダリングのスキル以外に、チェーンのテンショナーやバネ効果、プロペラのフライホイール効果も考えられる。人体エンジンの効率では、スキルの違いによって同一出力パワーでも、ピークパワーには6割もの開きが生じ、効率良いペダリングスキルの重要性が解る。

OHP-11

問題点として、脈動の増幅について述べる。図7はペダル側とプロペラシャフト側の測定値を重ねたものである。下の濃い青がペダル側で、上の赤がプロペラ側である。ギヤ比は1.56である。従って、ペダル側の測定値を1.56倍したものが、概ねプロペラ側の測定値になるはずである。ペダル側の値の1.56倍を薄い青で示した。チェーンの伸びやプロペラシャフトの歪、フレームの変形が有るから、プロペラ側の測定値は僅かながら右にずれる。問題は、カーブの形と周期はほぼ同じだが、振幅が違うことである。赤のプロペラ側の実測値の方が振幅が大きくなっている。ペダル側で測定された振幅；14.5回転にギヤ比1.56を掛けた値；22.6回転が、プロペラ側では29.3回転；ペダル側の2.02倍になっている。これはチェーンとギヤを介して、脈動の速度の振幅が増幅されたことを示し、伝達効率の低下原因になる。

OHP-12

増幅の原因は、チェーンに作用する遠心力や駆動系に働く加速度の変化が、回転速度の振幅を増幅させる、ペダル側スプロケットが1サイクルの脈動を履歴する間に、プロペラ側スプロケットは1サイクルの脈動を履歴しながら1.56回転する事による、ギヤ比の問題、チェーンテンショナーの影響、プロペラに作用する慣性力等が考えらる。

脈動の対策を述べる。

トレーニングにおける注意点では、エルゴメーターを使ったトレーニングは、体力の向上には効果的であるが、ペダリングスキルの向上には要注意である。エルゴメーターは、機能上フライホイール効果の有るものが多く、ペダリングの脈動による回転速度の増減を平滑化する制御効果がある。人力飛行機のプロペラは、軽量で、回転速度が低いので、殆どフライホイール効果が期待できない。つまり、エルゴメーターの持続時間をそのままフライト時間に適用できない。特に持続時間が数分以下のアナロピックパワーの出力が支配的な場合は、プロペラペダリングの持続時間が半減してしまう。これが人体エンジンのエネルギー効率の問題である。プロペラを実装したコクピットを使って掻き回すように漕ぐロータリーペダリングのスキルの習得のトレーニングが重要である。これには、ロータリーペダリングのための回転速度とトルクの安定要素に注意が必要である。

OHP-13

フライホイール効果を狙った機体は、海外では一般的である。クレーマースピード賞の最終獲得機マスキュレアー号では、ペダル側に大きなフライホイールを兼ねたスプロケットを使い、プロペラの回転数は190回転に達している。

最後にまとめる。自転車漕ぎ式ペダリングの脈動の実態を明らかにし、問題点と対策を述べた。自転車ペダリングの脈動は、速度成分とトルク成分が重複した複合脈動である。2つの成分の減衰率が伝達効率を示すが、減衰に至る過程でフライホイール効果のように必ずしも効率低下に繋がるものばかりでなく、改善に寄与する効果や影響も見られる。人力飛行機のプロペラは、一般に回転数を上げると空力的な効率が低下する。駆動系の設計は、回転数の上昇による脈動の制御効果、脈動による空力的なプロペラ効率の低下、チェーンとチェーンテンショナーの影響の解明と相俟って、プロペラ重量と回転数の最適な妥協点を見出さなければならない。

OHP-14