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)淺沼組)
坂本慎介（三菱電機㈱）
堀琴乃(東陶機器(株))
名古屋大学 AirCraft
○佐多宏太（名古屋大学大学院）

A study of pedaling on Human-Powered aircraft.

Key Words: recumbent style, pedaling, pulse, fly-wheel

Abstract

The power at the Human-Powered aircraft is generated by pedaling the normal bicycle. Pedaling generates the pulses. It is necessary to know how it works for improving the efficiency of the machines. The influence of the pulse to the efficiency had not been made clear until we measured. In this paper, we introduce how real pedaling is and suggest the problem.

1) まえがき　人力飛行はその名の通り，人が航空機のパイロットとエンジンの二役を務める．通常パワーの抽出は，自転車漕ぎペダリング手法による．自転車ペダリングは，日常生活で慣れ親しんだ姿勢ながら，押し漕ぎに頼るため効率が悪い欠点を持つ．一方自転車競技では効率改善に，引き足の有効利用にトゥクリップや競技用シューズが用いられ，人力飛行機（以下，HPA）でも同様のシューズを利用している．

押し漕ぎと引き足を組み合わせた滑らかな（**掻き回すような**）ペダリングは，高速回転・高出力・振動防止に有効であるが，そのペダリングにはそれを有効に活用できる特異なスキルの習得が必要である．その獲得には 10 年に及ぶ絶え間無い練習が必要とすら云われる.ペダリングの問題の一つに‘脈動’が有り，機械効率の向上にはその実態把握と対策が重要である．これまで脈動の実態には不明な点が多かった．今回我々はそれを実測し明らかにした．ペダリングの実態を紹介し，問題点について考察する．

2) 脈動の原因と影響　自転車と HPA の相違点に，①HPA はプロペラを介して空気に仕事をし，自転車の接地抵抗の大きい地面に比べてペダリングの反応が異なる ②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るが，HPA は軽量化の観点や仕事の対象が空気なのでその必要は無い　等が有る．

2-1）脈動の原因　自転車ペダリングの脈動には，**速度**と**トルク**の 2 つの振動成分が有る．

①ペダリングのスキル;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，それ以外は減速している．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有り，加速度の変化が脈動を生じる．そこでは回転速度とトルク，パワーがほぼ 0 に成り，片足単気筒の 2 気筒エンジンの特徴を持つ．

	呼称	ピッチ (mm)	重量 (kg/m)	破断荷重 (kg)
人力飛行機	RS-25	6.35	140	480
自転車	RS-40	12.70	640	1950

図-1．チェーンの比較

②チェーンの振動；HPA の駆動系は軽量化を目的に，自転車に比べて細いチェーン；RS-25 を用いることが多い. 伸びは自転車のそれの 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（振幅）を増幅させる（駆動系に働く加速度変化が回転速度の振幅を増幅させる）.ギヤ比の影響も無視出来ない.チェーンテンショナーの最適配置が要素になる．

2-2）脈動の影響　①伝達効率の低下；チェーンの振動と張力変化，甚だしい場合の歯飛び等が伝達効率を低下させる．②プロペラ効率の低下；プロペラの回転速度の脈動は，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．③機体の設計；脈動は，プロペラシャフトの捻りモーメントを脈動させ，プロペラブレードの設計に影響する．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から主翼取り付け部の設計に影響する．

3) 測定方法　実機（CHicK-2000）と同じレイアウトのコクピットフレームを製作して測定した．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．詳細は，第2回スカイスポーツシンポジウム講演集『2A7 人力飛行機の離陸滑走時の必要パワーの測定』P171～178，第3回スカイスポーツシンポジウム講演集『2A1 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』P113～120による．

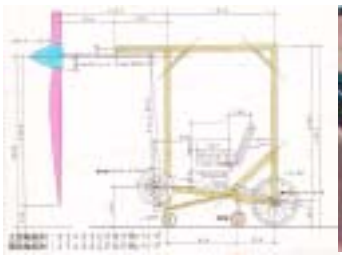


図-2．測定フレーム側面図

図-3．測定装置

図-4．歪ゲージの取り付け

4) 測定結果　以下に測定結果を示す．押し漕ぎペダリング（以下，PP;push- pedaling）には，離陸滑走時のロープドライブとプロペラドライブ併用のフルパワーペダリングの測定データを，滑らかなペダリング（以下，RP;rotary-pedaling）には，引き足を併用したプロペラドライブで，フレーム停止状態，90rpmでペダリングした時のデータを示す．

図-5.1～4はPPで，5.1に停止時からペダリング開始以後8秒間の加速状態を示す．5.2～4に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-6.1～4はRPで，図-5のPPと対比する．測定は共にペダル側による．図-7はRPの測定で，ペダル側とプロペラシャフト側の結果の比較を示す．

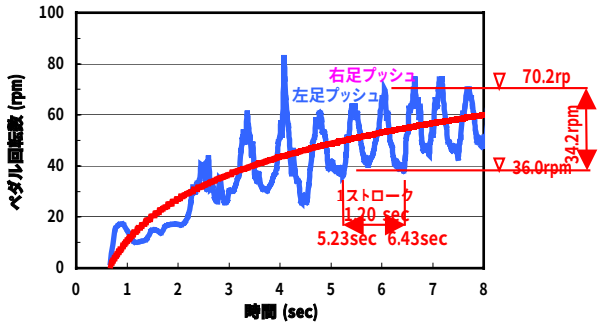


図-5.1 回転数

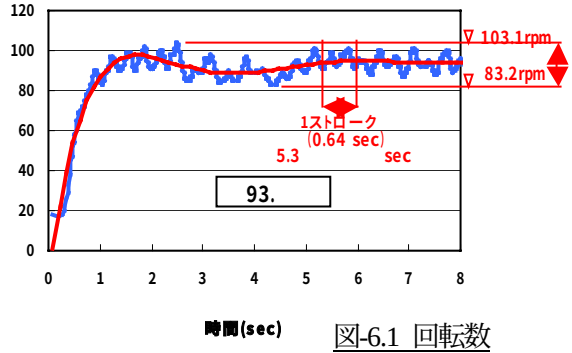


図-6.1 回転数

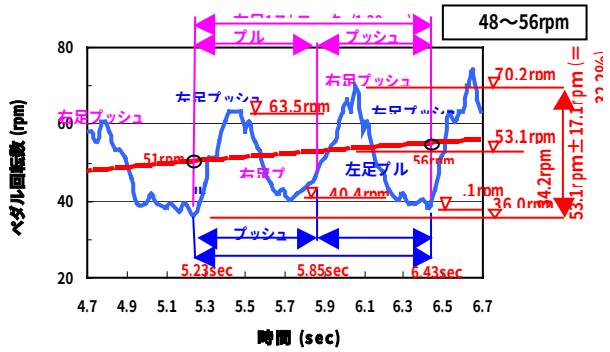


図-5.2 回転数

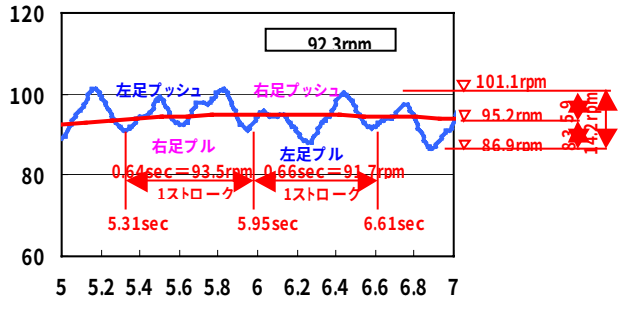


図-6.2 回転数

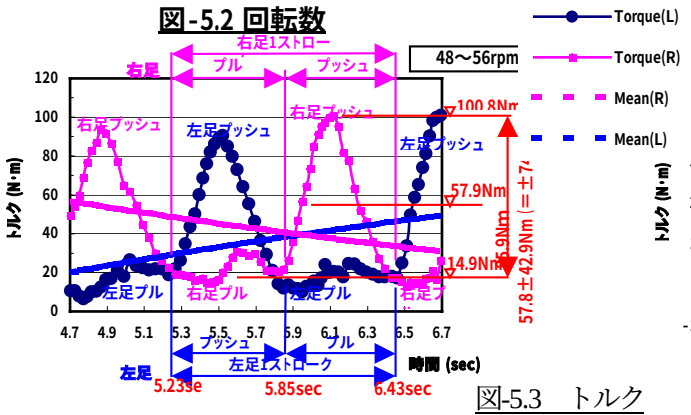


図-5.3　トルク

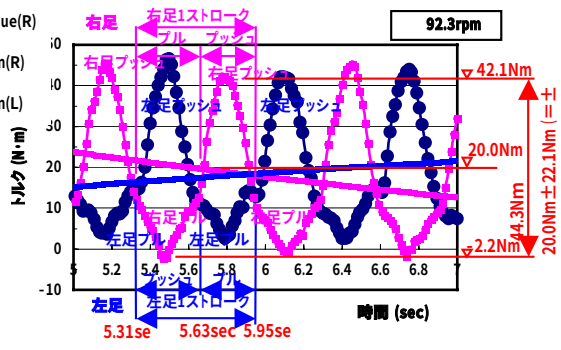


図-6.3　トルク

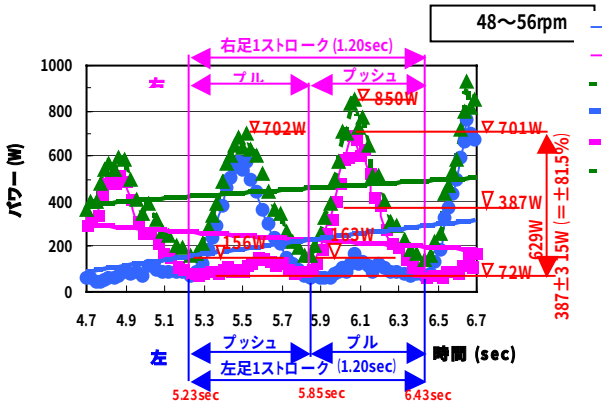


図-5.4 パワー

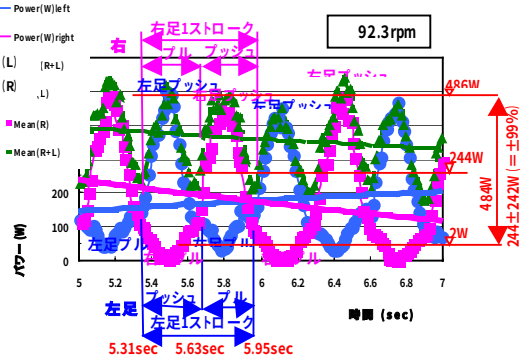


図-7 回転数の比較

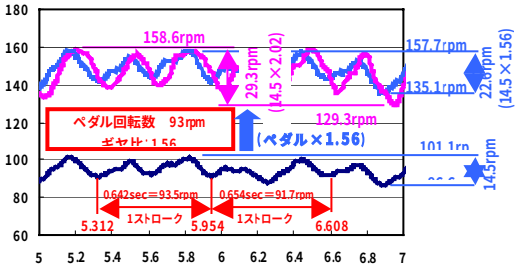


図-6.4 パワー

5) 考察　ペダル回転数；① PP では，1 ストローク当たりの平均回転数 53rpm に±17rpm（±32%）振動するが，RP では 95rpm±7rpm（±7%）である．② RP では回転数の維持に±7%振動するが，PP では 1 ストローク当たり約 5rpm 回転数を増加させるのに±32%振動した．**トルク；**① PP でも RP でも左右のトルクに大きなばらつきは無い．② PP では，プルのトルクの最小値が RP よりも大きく（平均値で約 2 倍（　20 N･m ）），引き足時の変動が少ない（サインカーブを描かない）．③ RP では，その変動が，振幅は異なるがサインカーブを示す（振幅の比　プッシュ：プル　3：1）．④ RP の引き足時のトルクの最小値は僅かに負の値を示す．⑤PP では，1 ストロークの平均トルク 57.8 N･m に対して±43.1 N･m （±75%）振動するが，RP では 19.6 N･m ±21.6 N･m （±111%）振動する．⑥ トルクの最大値は，PP でも RP でも平均値の約 2.5 倍に達する．**パワー；**①PP 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，RP では 244W±242W（±99%）で有る．② PP も RP も，パワーの最大値は平均パワーの約 2 倍に達する．以上から，

ⅰ) 駆動系の設計は，回転数に対しては大きな安全率を見込む必要はないが，トルクとパワーは，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．具体的には，CHicK-2000 の定常飛行時の必要パワーは約 170W であるが，自力離陸～上昇時，瞬間最大パワーは 1000W に達する．実際にプロペラに導入されるパワーは約 600W で，プロペラブレードの撓みを定常飛行時でスパンの 1.5～2%に押さえて設計しているが，瞬間的には 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．

ⅱ) RP では，回転数は非常に平滑になり脈動のサインカーブは観察し難い．これは引き足を使って掻き回すように漕ぐペダリング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．回転数が滑らかなのは，上記以外にチェーンテンショナーやチェーンのバネ効果，プロペラのフライホイール効果（以下，FW 効果）の影響が考えられる．

6) 問題点　脈動の増幅； 図-7 にペダルとプロペラシャフトの回転速度を比較する．スプロケットのギヤ比は，ペダル側：プロペラ側＝1.56：1 である．ペダル側で測定された振幅(=14.5rpm)にギヤ比 1.56 を掛けた値(=22.6rpm)がプロペラ側の振幅と考えたが，29.3rpm（2.04 倍）を測定した．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す．伝達効率の低下原因に繋がる．増幅原因は，チェーンに作用する遠心力，ギヤ比（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），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れる．　**ペダリングスキル；** エルゴメーターを用いた体力トレーニングは基礎体力の向上に効果的だが，ペダリングスキルの向上には注意を要する．エルゴメーターは，機能上 FW 効果が大きい．HPA のプロペラには大きな FW 効果が期待できないので，エルゴメーターの持続時間がフライト時間とはならない．特に持続時間が数分以下のアネロビ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は半減してしまう．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**トレーニングが重要である．

図-8．エルゴメータトレーニング

7) 脈動対策　プロペラにはその自重による FW 効果が有る．FW 効果は，重量に比例し，回転数の二乗に比例する．ここでは脈動の改善にプロペラの重量とその分布，回転速度の変化による慣性モーメント I[kgm²]およびプロペラの回転数の効果について，数値計算により検証する．

プロペラの角速度をω[rad/s]，入力トルクを Tin[N･m]，プロペラにかかる空気力によるトルクを Tout[N･m]とする．プロペラの抗力とペダルからの入力を考え,式（1）を用いる．

C はプロペラの回転数から，適当な値（C=0.1385）を導いた．

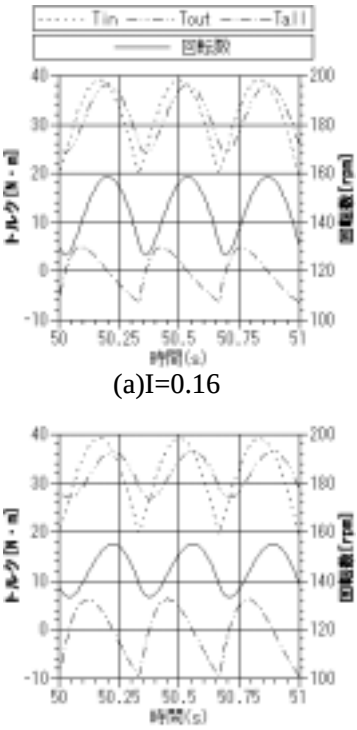
$$I\dot{\omega} = T_{in} - T_{out} = T_{in} - C\omega^2 \qquad (1)$$

入力トルクは足回りの回転数を 90rpm とした時のプロペラ軸のトルクを測定した,我々の測定結果から代表値として式(2)のトルクを入力した(g は重力加速度)．

$$T_{in} = 2g\left|\sin(3\pi t)\right| + 2g \qquad [\mathrm{N\cdot m}] \qquad (2)$$

<u>7-1) 慣性モーメントの変化</u>　CHicK-2000 のプロペラは，1 ブレード当たりの重量が 0.408kg，重心位置は中心から 0.440m にある．慣性モーメント I は 2 枚で $I = \sum_i m_i r_i^2$ より，I=0.16 とする．プロペラの平均回転数を 145rpm に設定．比較のため I=0.32 の場合を求めた．

計算結果を図-9(a)(b)に示す．I=0.16 の時，定常回転時のプロペラの回転数の最大値は 158rpm，最小値は 126rpm，差は 32rpm であり，脈動率は 22.1%である．I=0.32 の時，最大値は 155rpm，最小値は 133rpm，差は 22rpm であり，脈動率は 15.2%となった．これより I が 2 倍になった時，脈動が 68.8%に抑えられている．従ってプロペラの FW 効果は，プロペラの重量増もしくはドライブシャフトに FW を取り付け，慣性モーメントを大きくした時に制御効果がある．しかし，慣性モーメント I の増加分に見合う効果は期待でき無い．（脈動率＝負荷変動分／負荷の平均値）



(a)I=0.16

(b)I=0.32

<u>図-9．慣性モーメント変化によるプロペラの脈動</u>

<u>7-2）プロペラの回転速度の変化</u>　入力トルクを式(2)とし，式(1)の C を変化させ,プロペラの回転数を変化させて比較した．I=0.16 で 200rpm に設定した時（C=0.073），最大値は 217rpm，最小値は 179rpm，差は 38rpm で,脈動率は 19%となり,脈動率は 86%に抑えられた.290rpm に設定すると(C=0.035),最大値は 310rpm，最小値は 266rpm，差は 44rpm であり，脈動率は 15.2%になる．従って，プロペラの回転数を上げることは慣性モーメント I を大きくするのと同様に脈動の制御効果が得られる．

上記のモデルは，プロペラ側スプロケットにトルクを直接入力したモデルで，チェーンの影響は考慮していない．チェーンを介した駆動系において FW 効果を期待する時，その取り付け位置に以下の 2 ケ所が考えられる．①ペダル側；入力側に FW 効果を期待．駆動系の負担を制御．②プロペラ側；出力側に FW 効果を期待.プロペラ～プロペラ側スプロケットの系に FW 効果を期待,プロペラの速度変動を制御．この時，動力伝達媒体のチェーンは,そのばね効果によって振動を緩和し，FW 効果の活用に貢献すると思われる．

脈動の制御は,上記を考慮した機体とパイロットに最適の FW の配置が有効と考えられる．

8) まとめ　本稿では，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，速度成分の脈動とトルク成分の脈動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 FW 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．HPA 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．

[参考文献]

1)堀琴乃ら：人力飛行機の離陸滑走時における必要パワーの測定．第 2 回スカイスポーツシンポジウム講演集,1996

2)坂本慎介ら：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．第 3 回スカイスポーツシンポジウム講演集,1997

3)堀琴乃ら：人力飛行機の離陸滑走時における最適ギヤ比決定のための必要パワーの測定．第 3 回スカイスポーツシンポジウム講演集,1997