

逆位相トルクの付加による人力飛行機の 脈動現象の低減に関する研究

○小島拓也, 白杵智章 (京都大学鳥人間 ShootingStars)

Reduction of Angular Velocity Fluctuation of HPA's Drive System
by Torque Fluctuation Canceller

Takuya Kobatake and Tomoaki Usuki (Kyoto-University Birdman Team)

Key Words : HPA, Drive System, pedaling, Equipments, TFC

Abstract

An angular velocity fluctuation of HPA's drive system caused by a torque fluctuation disturbs comfortable pedaling. We attached the Torque Fluctuation Cancel system to the drive system in order to reduce the angular velocity fluctuation.

1 研究内容

当チームは人力飛行機の脈動問題をパイロット出力トルク変動の観点から考察し、その根本的な解決方法としてTFC (Torque Fluctuation Cancel) 機構を開発した。その結果、脈動現象はほぼ解消され、人力飛行機的设计、運用、操縦が大幅に簡単化された。本研究ではその効果を検証した。

2 研究背景

人力飛行機における特徴的な現象として、駆動システムの脈動現象がある。これはパイロットがペダリングに脈打つような抵抗感を感じる現象で、パイロットに疲労を与える主な要因になっていると同時に、人力飛行機の操縦を難解にしている一因である。以下に脈動現象がもたらす深刻な弊害をいくつか挙げる。

2.1 パイロットの出力及び持久力の低下

人力飛行機を漕いでみると、脚に力を入れた時に空回りするような感覚を覚える。逆に、力が入らない下死点においてはペダリングが極度に重くなる。これらは通常の自転車のペダリング感覚とは大きく異なるものであり、搭乗者にとって不快な感覚である。当チームの全パイロットは人力飛行機のペダリング感覚に不快感を示し、平均して設計負荷以上の負荷を感じると報告している。トルクを一定に保つペダリングテクニックによって脈動がある程度抑制されることが分かっているが、脚に不自然な負荷を与えながら特殊なペダリング動作をすることになるため、脈動は減るもののパイロットにとって肉体的・精神的負担が大きい。結論として、脈動問題は人体のパワーを大きく制限し、パイロットへの要求を厳しくしていると言える。

2.2 プロペラ効率の低下

一般に人力飛行機のプロペラは、その厳しい効率要求を満たすために、設計された巡航速度と回転数の付近において極端に高い揚抗比を実現するように設計されている。しかし、現実には人力飛行機のプロペラは脈動によって回転

数が瞬間的に大きく変動する。一方で機速は変化が緩慢なため、プロペラの有効迎角は大きく変動し、設計された範囲でプロペラが使用されることが期待できない。従ってその効率は設計より低いものになっていると考えられる。本研究で実測されたプロペラの角速度変動は30%に達し、脈動周期に合わせて翼端失速に入っている可能性がある。また、実際に脈動周期と同周期の大きな周期的風切り音も観測されている。

2.3 駆動システムの変形・振動

人力飛行機の動力は2-300Wの定出力で見積もられることが多い。しかし、実際はその約2倍のパワーでパルス的に出力されている。これによって、駆動システムの部材は大きな荷重を受けて変形する。この荷重条件に耐えるため、動力伝達系やプロペラには高い剛性・強度が求められている。結論として、脈動現象は人力飛行機の強度設計に厳しい条件を課しており、重量増を招いていると言える。また、変形に起因して多くの箇所システムに振動が生じており、チェーン脱落などのシステム信頼性の低下とエネルギーロスも招いている。

3 脈動現象の理論的分析

まず、脈動現象が実際にどのような要因で生じるのかを、モデル化された駆動系によって考察した。以下に、人体-プロペラシステムが理想的な動力伝達で接続されていた場合に不可避免的に脈動が生じることを示す。

3.1 駆動システムの運動方程式

プロペラを含む駆動系の回転運動を考える。一般に、剛体の回転運動は、次式で記述される。

$$I\ddot{\theta} = N_{total} \quad (1)$$

ここで、 I は剛体の回転軸まわりの慣性モーメント、 θ は回転角、 N_{total} は全トルクの和を表す。駆動系を構成する各機械要素は、式(1)を満たすとす。ここで、プロペラシャフトの回転運動系を考える。つまり、 $\dot{\theta}$ をプロペラの角

速度とすると、 N_{total} はプロペラシャフトに働く外力による全トルクである。 I は、プロペラシャフトを含む全駆動系の各々の要素の慣性モーメントを、式 (1) を満たすように換算したものである。

3.2 トルク N_{total} の考察

回転軸対称なので、重力によるトルクは 0 であり、 N_{total} は、パイロットのペダリングトルク N_H と、空気力によるトルク N_A 、そして機械損や弾性変形によるトルク N_M の和で表される。 N_H を回転角の正の向きに取ると、

$$N_{total} = N_H - N_A - N_M \quad (2)$$

である。ここでは、簡単のために機械損等によるトルク N_M は無視出来ると仮定する。

$$N_M = 0 \quad (\text{理想伝達の仮定}) \quad (3)$$

これは、システムに変形等が無いとした場合を想定しており、精巧なギアボックスによる動力伝達に近い状況である。

次に、踏力によるトルク N_H について考える。自転車等のペダル運動におけるトルク変動は顕著で特徴的である。その特性は正弦波型で、Fig.1 の示すペダル位相の関数になっている。(引用：ブリヂストンサイクル株式会社)

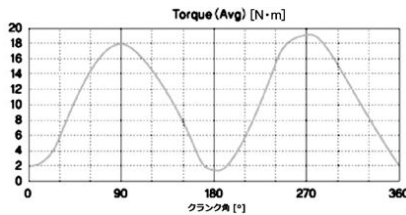


Fig.1 ペダリングトルク特性

(<http://www.bsycle.co.jp/root/catalog/prestino/lab0.html>)

Fig.1 より、クランク軸に加わるトルクはペダリング 1 回転のうちで 2 周期分振動することがわかる。それぞれ右足と左足の踏力パルスに対応している。ここでは簡単のために、トルクはペダル位相のみの関数であると仮定する。こうすることで、クランク軸に加わるペダリングトルク $N'_H(\theta_p)$ は次の関数に近似される。

$$N'_H(\theta_p) = N_0 + A \cos 2\theta_p \quad (4)$$

ペダル位相を θ_p 、ペダリングトルクを N'_H とした。 N_0 は N'_H の平均値、 A はパイロットに固有のトルク振幅である。また、平均トルクに対するトルク振幅の割合 $(A/N_0) \times 100$ をトルク変動率と定義する。このグラフにおけるトルク変動率は 80% である。このトルクが回転軸変換を経て伝達されるので、プロペラシャフトに加わる N_H を求めるには N'_H に対してギア比を考慮した変換を施す必要がある。ギア比 a によってプロペラ回転数がクランク回転数の a 倍になったとすると

$$\begin{aligned} N_H &= \frac{1}{a} N'_H \\ &= \frac{1}{a} (N_0 + A \cos 2\theta_p) \end{aligned} \quad (5)$$

次に、空気力によるトルク N_A について考える。これは機速を固定した場合、プロペラ角速度 $\dot{\theta}$ の増加関数であるので、

$$N_A = N_A(\dot{\theta}) \quad (6)$$

とおける。これが具体的にどのような関数であるのかは非常に重要な関心事であるが、実際にはヒステリシス要因が加わった非常に難解な非定常問題であり正確に求めることは出来ない。ここでは単調増加関数であるという仮定だけに留めておく。

3.3 モデル化された駆動システムの挙動

式 (3)、式 (5)、式 (6) により式 (1) は次の微分方程式に書き表される。

$$I\ddot{\theta} = \frac{1}{a} (N_0 + A \cos \frac{2\theta}{a}) - N_A(\dot{\theta}) \quad (7)$$

クランク角速度、つまり $\dot{\theta}_p$ は、式 (7) の微分方程式を θ について解くことにより求められる。その際、 $\theta = a\theta_p$ を用いる。

数値解析の結果、角速度 $\dot{\theta}_p$ はパイロットのペダリングトルク変動と同期して周期的に変動することが分かった。すなわち理想的な駆動システムにおいてもパイロットのペダリングトルク変動によって脈動が生じることが示された。この脈動を「潜在脈動」と呼ぶことにする。一方、駆動系の弾性やあそびによって引き起こされる脈動は「機械脈動」と呼んで区別することにする。なお、式 (7) における各定数を実測等によって定量化すれば、脈動の大きさを理論的に定量化することが出来る。

ここで得られる重要な結論は、機械脈動が生じない理想的な動力伝達系を実現出来ても脈動問題は解決されないということである。したがって脈動問題を根本的に解決するためには、機械脈動を抑える従来の工夫に先立ち潜在脈動を無くす必要がある。潜在脈動が無くなれば、機械脈動を引き起こす要因であるシステムの変形も低減されるので、機械脈動も同時に抑制されると考えられる。

3.4 トルク変動キャンセラー

当チームは潜在脈動問題の根本的解決策として、トルク変動キャンセラー (TFC 機構) を考案した。上記の通り、潜在脈動現象は、プロペラシャフトに伝達されるペダリングトルク N_H が正弦波振動していることによって引き起こされるプロペラ角速度変動現象である。そこで、プロペラシャフトに伝達される前の段階でペダリングトルクに逆位相トルクを付加してトルク振動を相殺することを試みる。この逆位相トルクをキャンセリングトルクと呼ぶ。すなわち、以下の式を満たすようなキャンセリングトルク N_{TFC} をシステムに与えれば良い。

$$N_H + N_{TFC} = \text{const.} \quad (8)$$

この場合、 $N_{TFC} = -\frac{1}{a} A \cos 2\theta_p$ とすれば

$$\begin{aligned} N_H + N_{TFC} &= \frac{1}{a} N_0 \\ &= \text{const.} \end{aligned} \quad (9)$$

を実現出来る。このようなトルク N_{TFC} を付加すればプロペラシャフトシステムは単純化され、

$$\begin{aligned} I\ddot{\theta} &= N_H + N_{TFC} - N_M - N_A \\ &= \frac{1}{a}N_0 - N_A(\dot{\theta}) \end{aligned} \quad (10)$$

したがって空気力による抵抗とパイロット平均トルクが釣り合うまでシステムはなだらかに平衡へ向かい、パイロットが回転数計を見ながらケイデンスを調整することで定速回転状態で安定する。以上の原理を用いた脈動低減機構を総称して TFC 機構と呼ぶ。

今年度は当チームの人力飛行機「深空」に搭載する目的で、バネを使った TFC 機構を開発した。この逆位相トルクを発生させる機構は、非常に簡単な構造により実現できる。TFC 機構の写真とコンセプトを Fig.2 に示す。

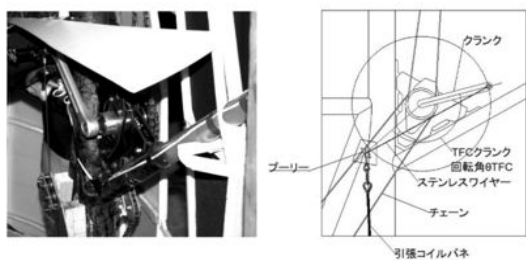


Fig.2 TFC 機構のコンセプト

TFC クランクの半径を r 、回転角を θ_{TFC} とする。この機構によって TFC クランク軸に以下のキャンセリングトルク N'_{TFC} を生成する。このトルクはギア比による変換を経てプロペラシャフトに伝達される。

$$\begin{aligned} N'_{TFC} &= kr^2 \sin \theta_{TFC} \\ &= C \sin \theta_{TFC} \end{aligned} \quad (11)$$

C は TFC クランク軸に生成されるトルク振幅である。キャンセリングトルクの位相・振幅・波長をペダリングトルクに対して適切に合わせ、この機構を駆動システムに接続することで理論上は 100% トルク振動を打ち消すことができる。しかし、モデル化されていない実際的な問題については、実際に回転試験を重ねて調整していく必要がある。

4 TFC システムの実証試験

当チーム 2011 年度機体とパイロットに対して最適化した TFC 機構によって、脈動現象がどの程度解消されたかを実証試験によって確認した。

4.1 TFC 機構の設計

まず、TFC 機構のトルク波長を決定する。パイロットはペダリング 1 回転につき 2 波長分のトルク振動を生成するので、ペダリング 1 回転につき TFC クランクが 2 回転すれば良い。すなわち、ペダルクランクに対して TFC クランクはギア比 2 で接続することで TFC とパイロットのトルク波長が一致する。

次に、TFC 機構のトルク振幅 C を決定する。そのために、パイロットがペダルクランク軸に出力するペダリング

トルク N'_H を具体的に求めた。定常のプロペラ理論に基づくプロペラ設計により、定常飛行時には式 (5) における平均ペダリングトルク $N'_0=29.8[\text{N}\cdot\text{m}]$ が要求されている。また、パイロットのトルク変動率が 80% であると仮定すると、振幅 $A=0.8N_0=23.8[\text{N}\cdot\text{m}]$ と推定される。TFC 機構はペダルクランクに対してギア比 $a=2$ なので、TFC 機構が生成するべきトルク振幅は式 (11) より

$$C = \frac{1}{a}A = 11.8[\text{N}\cdot\text{m}] \quad (12)$$

である。

最後に、TFC 機構におけるバネ定数 k とクランク長 r を設定する。今回の実験では $k=254[\text{N}/\text{m}]$ 、 $r=0.165[\text{m}]$ のものを採用した。この値を式 (11) に代入すると、 $C=6.9[\text{N}\cdot\text{m}]$ となる。この値は目標値よりも小さい値であるが、バネの初張力と TFC クランク干渉防止設計を加味することで実際には Fig.3 のようなキャンセリングトルクを生成する。

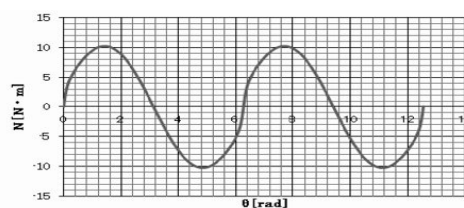


Fig.3 実際に生成される N_{TFC}

グラフより、最終的にはキャンセリングトルクの振幅は $C=10.3[\text{N}\cdot\text{m}]$ が実現される。

4.2 実証試験装置

- TFC 機構
- ロードバイク用クランク (クランク長 165mm)
- 引張コイルバネ×2 (株式会社アキュレイト DE769)
- 2011 年度人力飛行機「深空」
- 100Hz 点滅赤色 LED
- 測定用カメラ

採用した引張コイルバネの仕様を Table1 に示す。

Table1 DE769 の仕様

パラメータ	数値
自由長さ [mm]	211.6
バネ定数 [N/mm]	0.127
許容荷重 [N]	61.78
許容荷重時長さ [mm]	621.6
初張力 [N]	9.846

4.3 実証試験の方法

本実験では TFC を搭載する場合と搭載しない場合の人力飛行機の駆動系の角速度の変動を、

1. TFC 非搭載 (バネ×0)
2. TFC 搭載 (バネ×1)

3. TFC 搭載 (バネ×2)

の3通りについて、それぞれ複数回、角速度を測定した。

4.4 角速度変動の測定方法

まず、100Hzで明滅を繰り返す赤色LEDをTFCクラックに設置した。踏力により駆動系が回転している状態で、クラックの回転軸の延長上に設置した測定用カメラを1秒間露出して撮影した。このようにして撮影した写真の例をFig.4に示す。次に赤色LEDの明滅間の角を測定すること

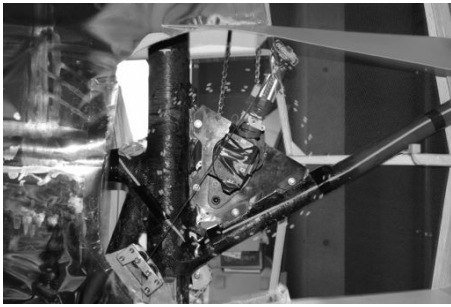


Fig.4 LEDを用いた角速度測定

でTFCクラックの角速度を決定した。次に、このようにして測定した角速度の変動のデータを三角関数に近似し、その振幅をもって脈動の大きさを評価した。近似関数には次式を用いた。

$$\omega_{TFC} = B \sin(\omega_0 t - \phi) + \omega_0 \quad (13)$$

ここで、 B は角速度振動の振幅、 ω_{TFC} はTFCクラックの角速度、 t は時間、 ϕ は初期位相を示す。また ω_0 はTFCクラックの平均角速度である。測定データからこれらの値を最小二乗法で決定した。

4.5 測定データ

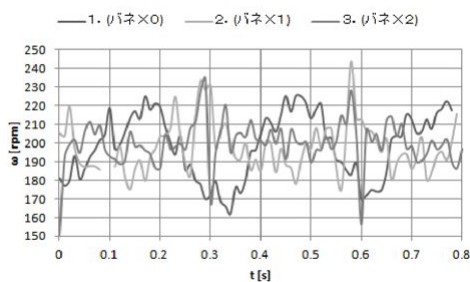


Fig.5 角速度変動の測定データ

4.6 解析および結論

1、2、3の各測定結果をもとに作成した近似関数の平均角速度 ω_0 と振幅 B を、Fig.6に示す。TFCにより角速度変動の振幅が著しく小さくなっているのが確認できる。

5 TFC 機構の検討および考察

5.1 パイロット負担の低減

本実験において、パイロットは「TFC機構の搭載により脈動感がほぼ無くなり、疲労感が大きく緩和された」と報

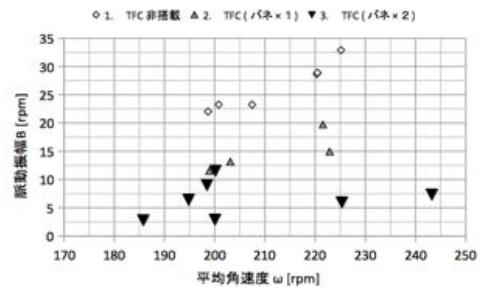


Fig.6 脈動振幅と平均回転数

告した。これは角速度変動が低減したという本実験の測定結果に合致する。従来、人力機のパイロットは引き足を多用しトルク変動を最小限に抑えるような特殊なペダリングテクニックが要求され、トレーニングを積んでいない人間には人力機の運用は困難だった。しかしそのような問題はTFC機構の搭載により解消され、トレーニングを積んでいない人間でも容易にフライトを楽しめるようになる。

5.2 プロペラ効率の向上

TFC機構を搭載していないプロペラシステムの回転数は瞬間的に設計回転数よりも30%近く高くなっており、この回転数域においてはプロペラが失速領域に入っている可能性がある。それによって推進システムがいくらか効率を落としていると考えられる。TFC機構を搭載した推進システムは安定したプロペラ周り定常流を実現しているので、効率が向上していると考えられる。

5.3 TFC 機構の課題

TFC機構は駆動系に組み込まれる可動機構であるため、システム信頼性という点では非搭載機に劣る。2011年度の鳥人間コンテストにおいてTFC搭載機である当チームの「深空」はTFCシステムの一部が駆動システムに絡まり1600m地点で墜落した。また、現在はキャンセリングトルクの振幅が半固定であるため、フライト中に出力が大きく変化する場合には対応できない。

5.4 設計自由度の向上による次世代人力機への展望

脈動問題は高出力機になるほど顕著になると考えられる。高出力化に伴って脚部・心肺の代謝能力の限界が近づくのに加えて、トルク変動が大きくなると予想されるからである。そのため、長時間航続する人力飛行機の運用は2-300W出力に抑えることが基本となっているが、TFC機構を搭載すれば脈動問題による設計・運用上の出力制約が少なくなる。例えばタイムトライアル用の高速人力機や人力ヘリコプター等にも応用でき、脈動に起因する種々の制約を減らすことが可能である。

6 参考文献

- 1) 吉川利明ほか：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，日本航空宇宙学会。
- 2) 吉川俊明ほか：人力飛行のペダリングに関する考察，第8回スカイスポーツシンポジウム講演集，日本航空宇宙学会。