



第14回
科学の甲子園 全国大会

実技競技③

「フライホイール大作戦」

～回転エネルギーを操ろう！～

解 説

1. 本競技課題の出題意図

科学の甲子園全国大会の実技競技③では、身近な現象や技術を利用した機体や装置を製作し、その動作原理の知識を基に理解・分析し、競技で求められる性能やルールに対する最適解・最善解を科学的手法によって追求することが求められてきました。

今回はフライホイール（以下 FW）という回転体を使って、エネルギーの出し入れをコントロールすることで、各レースで適切な速さに調整することが要求されました。FW の運動の基本原則（つまり剛体の物理）自体は高校物理の範囲外ですが、それほど複雑な式は必要とせず、実験を重ねればその定性的なふるまいは直感的に理解しやすい現象であったはずです。しかし、実際にはあらゆる接触部での摩擦を考慮しなくてはならず、計算のみで完璧に運動を予測することは難しかったと思います。

そこで、理論構築や実験結果の解析を通じて、どのような機体を製作していけばよいか、その最適解に向けて計画性をもってアプローチしていくことが大切になります。理論構築からスタートして実験結果との違いを詰めていく方法、とりあえず機体を作って実験し、そこから定性的な理論を理解する方法、あるいは既製品を模倣して、そこから競技規定に従ったものに調整していく方法などです。

今回は自由度の高い製作ができた分、事前の試行から想定通りの運動をする機体をしっかり作り込んでくることが、本競技の重要な点となります。

2. FW を搭載した機体の運動の基本原則

制御レースでは、そのまま機体をスタートさせると、2, 3 秒で走り抜けてしまう距離を、25 秒かけて走らせるものでした。バンブレースにおいても、速すぎると衝撃で積載物が落ちてしまうため、いかに位置エネルギーを回転運動エネルギーに変換して蓄え、斜面を下りきったときの速さを抑えることができるか、がポイントになります。

事前公開資料では、エネルギー保存則より近似的に、

$$Mgh = \frac{1}{2}Mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2$$

を示しました。ただし、 h は機体の初期位置の高さ、 M は機体全体の質量、 v 、 ω は斜面を下り終えたときの機体の速さおよびフライホイールの角速度、 g は重力加速度を表していました。右辺第 2 項が回転運動エネルギー、その中の I は FW の慣性モーメントで、FW 全体の質量を m 、回転半径を k とすれば、

$$I = mk^2$$

で表されると説明がありました。ここで回転半径 k は、質量の実効的な位置であり、FW 自体の半径ではない点に注意です。例えば質量 m_1 の半径 r の等密度円板の慣性モーメントは積分で計算され、 $m_1 \left(\frac{1}{\sqrt{2}}r\right)^2$ になります。つまりすべての質量 m_1 が半径 $k = \frac{1}{\sqrt{2}}r$

のところに集中しているように見えます。これが回転半径の概念です。

これらの式により、速さを小さくするには回転運動エネルギーを大きくすべきで、そのためには、FW の質量を大きくし、かつ回転半径 k が大きくなるようにおもりを配置する必要がありますとわかります。具体的には、FW の骨格はできるだけ軽量にし、ボルトなどのおもりを FW の外側に取り付けられるようなものが製作できたら良い、ということになります。

また、事前公開資料には、「FW の角速度 ω と機体の速さ v にも関係式がある」とヒントがありました。FW カーの車輪軸と FW 軸は何らかの方法で回転が伝わるようにできており、したがって FW の角速度 ω と機体の速さ v は比例関係にあるはずで、車輪半径を D 、車輪角速度を Ω とし、車輪角速度 Ω が増速比 n で FW の角速度 ω に伝わるとします。すると、

$$D\Omega = v, \quad \omega = n\Omega$$

の関係があるので

$$\omega = \frac{n}{D}v$$

という関係式が得られます。さらにこれまでの式を使って整理すると、斜面を下りきったときの速さ v は、

$$v = \frac{\sqrt{2Mgh}}{\sqrt{1 + \frac{m}{M}\left(\frac{k}{D}\right)^2 n^2}} = \frac{\sqrt{2gh}}{\sqrt{1 + \frac{m}{M}\left(\frac{k}{D}\right)^2 n^2}}$$

と表せます。 v を小さくするには $1 + \frac{m}{M}\left(\frac{k}{D}\right)^2 n^2$ を大きくすれば良いわけです。つまり、

$\frac{m}{M}$ から機体の質量は FW に偏らせた方がよく、 $\frac{k}{D}$ から車輪の半径より FW の回転半径を大きくした方がよく、 n から増速比を大きくすればよい、という事がわかります。

3. 回転の伝達機構

回転伝達機構として、さまざまな方法が考えられますが、大きく分けてギヤ、伝動ベルト、摩擦車、の3つによる方法が実現可能であったと思います。

ギヤを用いる場合は、3D プリンターが必須となります。開発のためには試行錯誤するのに時間がかかり、またパーツが増えるとその接触部に摩擦が発生するためエネルギーロスも大きくなります。しかし、精度よく工作でき、比較的理論に近い運動を実現でき、コンパクトな機体を製作できる、というメリットがあります。

伝動ベルトは、今回はゴムバンドしか使えませんので、伝動ベルト自体の伸び縮みによる振動があり、滑らかな運動ができず、ゴムバンド内部の摩擦熱等でのエネルギーロスも大きくなってしまいます。しかし直感的に製作でき、軸の太さや張力を変えて、増速比の微調整はしやすいというメリットがあります。

摩擦車とは、単に車輪や車輪軸の上に FW の軸を載せるだけのものです。そのため空転す

実技競技③「フライホイール大作戦」解説

ることもあり、完全に動力が伝達できない場合もあります。しかし最も簡単な製作方法でパーツ同士の接触箇所が少なく、軸の太さを変えて増速比の微調整もできるというメリットがあります。

FWは増速駆動（増速比を大きく）しないと大きな回転運動エネルギーを貯めることはできませんが、逆に伝動ベルトによる減速駆動になっていたチームも見受けられたように思います。機体の速さをコントロールするためにも、自分たちの機体で増速比がどの程度実現できていたのか、予備実験でしっかり把握しておくことも重要な要素でした。

いずれも、メリットとデメリットがあり、製作する機体自体の堅牢性や、増速比の制御、戦略によってどの方法が良いかが決まってきます。

4. 衝撃吸収の機構

バンプレースでは、積載物を落とさないように角材やアングルを乗り越える必要がありました。最も吸収しなければならない衝撃は、上下方向の衝撃です。それは瞬間的なため、周期の短い外力が加わると想定して良いでしょう。つまり衝撃吸収機構は、共振しないようにそれ自体の固有振動数が小さい（＝周期が長い）方が良いという事になります。みなさんの製作物には、ゴムやバネ、滑らかな曲面などで衝撃を吸収する、独自性ある機構が提案されていました。みなさんの製作した機体では、果たして上下方向の衝撃を吸収できるものはできていたでしょうか？

別の解法としては、車輪半径を大きくすることです。そうすることで、バンプ接触時に加わる外力の大きさを小さくでき、バンプの高さ分持ち上がるまでの時間が相対的に長くなり、結果衝撃は緩くなります。ただし、あまり半径の大きい車輪を作ると、平面性や車軸との垂直性、構造の安定性、ひいては機体の直進性の問題が発生してきます。

5. まとめ

本競技は、物理的な原理は簡単ですが、実際製作すると、いろいろな問題点や見落とししていた物理が見えてきたと思います。これらの課題に対してどのようなアプローチをとるかは、最適解にたどり着く重要なポイントです。このアプローチを意識化し（内化）、言葉で表して（外化）、自分たちのアプローチを客観視するようにすることが、プランニングシート作成の一つの目的でもありました。またセルフレビューシートも同様です。

製作された機体には、独自性のあるアイデアは非常に多く見受けられ、見ているだけで面白く、機構の目的や開発過程をいろいろと聞きたくなるほどでした。3Dプリンターを用いた影響もありますが、配布物の工作用紙などを使った工夫も多数見受けられ、みなさんの発想の豊かさには驚きを禁じえませんでした。

本競技を通して、自らの科学的思考力、開発過程を振り返り、今後の飛躍の糧にしたいと思っています。