



第8回 科学の甲子園 全国大会

実技競技③「ツール・ド・さいたま」

ジャイロ2輪車レース

解説



埼玉県のマスコット「コバトン」



さいたま市のマスコット「ヌウ」

「ツール・ド・さいたま」とは

実技競技③「ツール・ド・さいたま～ジャイロ2輪車レース」に出場された皆さん、お疲れ様でした。

ところで皆さん、最初「ツール・ド・さいたま」って何?」と思われたことでしょう。

世界最高峰のサイクルロードレース「ツール・ド・フランス」の名を冠した自転車競技イベントが、埼玉県さいたま市で『ツール・



©Yuzuru SUNADA

図1 ツール・ド・フランスさいたまクリテリウム

ド・フランスさいたまクリテリウム』として2013年から開催されています。さいたまクリテリウムは、1周約3.0kmの周回コースを走行します。舞台はさいたま新都心の高層ビル群の市街地などに距離の短い周回コースを設定し、それを何周もする形式のロードレースです。その年の「ツール・ド・フランス本大会」で各賞を獲得するなど大活躍したスーパースター達が集結し、さいたま新都心周辺の特設コースで熱戦を繰り広げる大会です。

実技競技③では、ご当地問題として『ツール・ド・フランスさいたまクリテリウム』をイメージし、ジャイロ2輪車を自転車に見立て、ロードレース同様に熱い戦いを繰り広げてほしいという願いを込めて、「ツール・ド・さいたま」という競技タイトルにしました。

最近、珍しく埼玉県を話題とした映画で大ヒットしている『翔んで埼玉』のある場面において、「埼玉は特に特化したものはないが、それなりに満たしている」や「何もないから何でもできる」という二つのフレーズがありました。埼玉県は、交通の便も充実し、東京にも近く、生活する上では“それなりに満たしている”県です。“何もないから何でもできる”というフレーズは、私たちに探求と創造の意欲をかき立ててくれます。

全国から都道府県代表チームがこの埼玉の地に集まり、科学の甲子園のスローガンである「広げよう科学の輪 活かそう科学の英知」を発揮して、「ツール・ド・さいたま～ジャイロ2輪車レース」を競い合いました。

以下では、本競技の要であったジャイロを用いた2輪車の安定化について、科学的な見地から解説するとともに、全国大会参加チームのプレゼンシートから各チームの工夫を紹介します。

回転の向きとトルク

図2に示すように、タンスのような直方体の物体が床の上に傾いて置かれている状況を考えましょう。物体にはたらく重力の影響は、重心のみに鉛直下向きにはたらく力で代表させることができます。また、物体には床から鉛直上向きに垂直抗力が働いています。図2左の状況では、重心にはたらく力は、床との接点を支点として物体を時計回りに回転させようとしています。その結果、この物体は倒れてしまいます。一方、図2右の状況では、重心にはたらく力は物体を反時計回りに回転させようとするので、物体は倒れません。

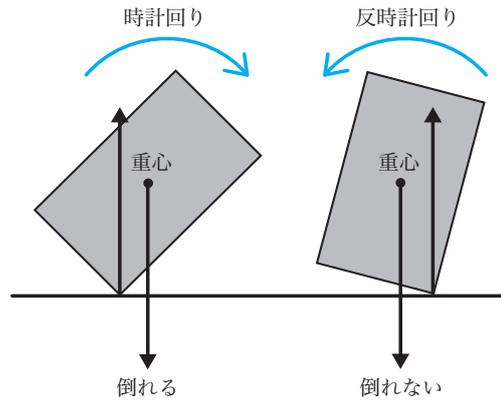


図2 物体にはたらく重力と垂直抗力

物体を回転させようとする力のはたらきをトルク（もしくは力のモーメント）と言います。トルクの大きさの定義はここでは述べませんが、「トルクの向き」は、そのトルクによってネジを回したときにネジが進む向きと約束します（図3左）。また、「回転の向き」も同様に、その回転の向きに回したネジが進む向きと約束します。

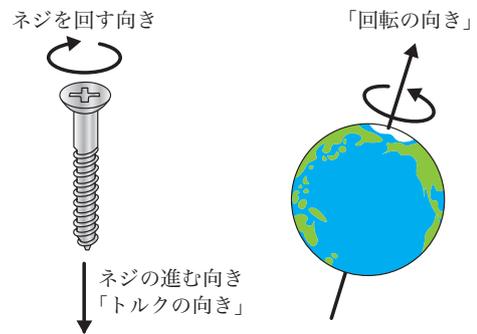


図3 トルクの向きと回転の向きの定義

例えば、地球の回転（自転）を表す向きは、図3右に示すように、南極から北極へ向かう向きです。図2左の状況においては、時計回りに回したネジは前に進むわけですから、トルクは紙面に向かう向きとなります。そして、このトルクによって引き起こされる回転の向きも、同様に紙面に向かう向きとなります。反対に、図2右の場合は、トルクの向きも、引き起こされる回転の向きも、紙面から出る向きとなります。いずれの場合でも、回転していない物体にトルクがはたらくと、トルクと同じ向きの回転が引き起こされることがわかります。

コマはなぜ倒れないか：コマの歳差運動

図4左のように回転していないコマを傾けて床の上に置くと、図2左の物体と同じように、紙面に向かう向きのトルクを受けて時計回りに回転し、倒れてしまいます。しかし、図4右のようにコマが勢いよく回転している場合は、コマは倒れずに歳差運動（すりこぎ運動）をします。この歳差運動を上から見ると、コマが反時計回りに回転している場合は反時計回り、コマが時計回りに回転している場合は時計回りになります。このような規則性はどのように説明できるでしょうか。

先ほど、回転していない物体にトルクがはたらくと、トルクと同じ向きの回転が引き起こされると述べました。このトルクの性質を回転している物体に自然に拡張すれば、回転している物体にトルクがはたらくと、物体の回転の向きはトルクの向きに変化する、となります。実際に、このトルクの性質からコマの歳差運動を説明することができます。

図5に示すように、傾いたコマが反時計回りに回転しているとき、回転の向きは斜め上向きです。このとき、重力と垂直抗力によるトルクの向きは水平かつ回転の向きと垂直になります。回転の向き（コマの回転軸と常に平行）は、このトルクの向きに変化していきま

すが、それに応じてトルクの向きも回転の向きと直角を保ったまま同時に変化していくので、結果的にコマの回転軸の先端は反時計回りに円軌道を描くことになります。これがコマの歳差運動の起源です。コマが倒れないのは、この歳差運動のおかげとすることができます。実際、図6のように、ベアリングなどの軸受けによってコマの自由な歳差運動を禁止してしまうと、コマは簡単に倒れてしまうことがわかります。

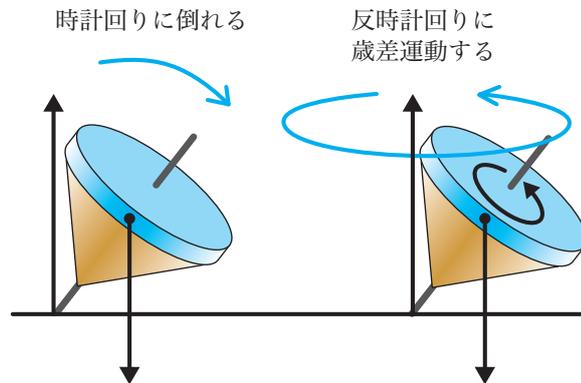


図4 回転していないコマと回転しているコマ

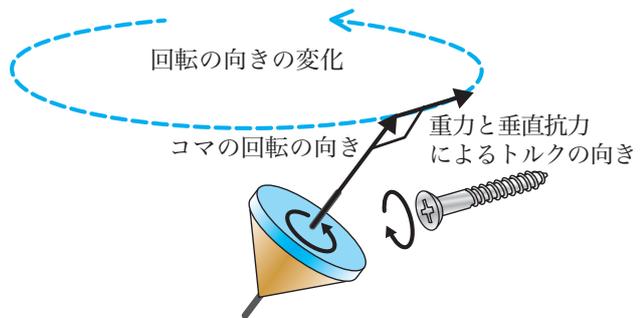


図5 回転の向きの変化（歳差運動）

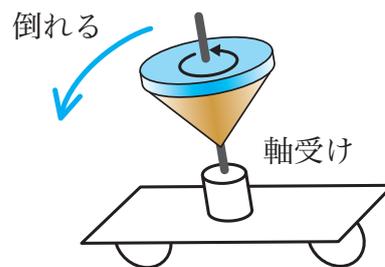


図6 自由な歳差運動を禁止されたコマ

ジャイロによる2輪車の安定化

コマの歳差運動を利用して2輪車を安定化させるためには、コマの回転軸の向きが自由に変化できなければなりません。図7のように前後に回転できるフレームを介して円盤型のコマを2輪車に取り付けると、2輪車は左右に傾くことができるので、結果的にコマの回転軸の向きは前後左右、自由に変化することができます。一般に、回転軸の向きを自由に換えられるコマをジャイロと言い、そのための可動フレームをジンバルと言います。

ジンバルによって回転軸の向きが自由に変化できるからと言って、このジャイロが自然と歳差運動するわけではありません。通常のコマの場合、図4に示したように歳差運動の起源は重心にはたらく重力と垂直抗力によるトルクです。図7のようにジンバルの軸の高

さがジャイロの重心の高さと等しい場合、ジャイロにはたらく重力はトルクを生み出しません。ジャイロにトルクを加えられるのは、ジンバルを支える2本の柱のみです。しかし、構造上、ジャイロを左右に倒そうとするトルク(向きは前後方向)を加えることはできても、ジャイロを前後に倒そうとするトルク(向きは左右方向)は加えることができません。図5に示したように、コマ(ジャイロ)が歳差運動をするには、トルクの向きは回転軸の向きの変化に応じて回転していく必要がありますが、図7のジャイロではトルクの向きが前後方向に限られているため、ジャイロは歳差運動をしません。よって、図7のジャイロでは2輪車を長時間安定化することはできません。

2輪車に搭載したジャイロを歳差運動させる簡便な方法は、ジャイロの重心の位置をジンバルの軸をより高くすることです。図8に示すようにジンバルにおもりをのせて、おもりも含めたジャイロ全体の重心の位置をジンバルの軸より高くしても効果は同じです。この場合、ジャイロの重心にはたらく重力が、図7のジャイロでは不足していた左右方向のトルクを生み出し、図5のように回転軸と直交するトルクが常にジャイロにはたらきます。その結果として、ジンバルの前後の傾きと2輪車の左右の傾きが一体となって、ジャイロの回転軸が歳差運動します。この歳差運動によって、2輪車は安定化されることとなります。コマはどちらに回しても倒れないのと同様、この安定化はジャイロをどちら向きに回してもはたらきます。ちなみに、ジャイロの重心の位置がジンバルの軸より低い場合、ジャイロの歳差運動は起きず、2輪車を安定化させることはできません。直観に反して、ジャイロの重心を上げて不安定な状況を作ることが、結果的にジャイロ2輪車の安定化につながるのです。

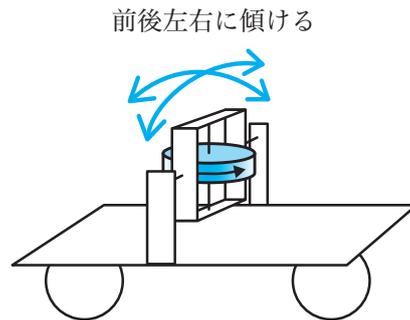


図7 ジンバルによって2輪車に固定されたジャイロ

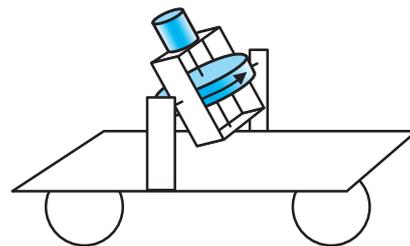


図8 おもりをのせて重心をジンバルの軸より高くしたジャイロ

全国大会で見られた各チームの工夫

本競技で製作したジャイロ2輪車は、ジャイロなしでは自立せず、車輪はレールによってその動きが制限されています。また、その推進力は、手回し発電機によって充電された電気二重層コンデンサに蓄えた電気エネルギーで模型用モーターを回転させ、プーリー等で車輪に伝えることで得ます。

ここでは、ジャイロ2輪車の安定化に向けた工夫、手回し発電機による電気二重層コンデンサへの充電における工夫、モーターの回転を車輪に伝える工夫の事例について、全国大会出場チームのプレゼンシート（全国大会前の3月4日締め切り）からピックアップして紹介します（学校名は公開しません）。

<ジャイロ2輪車の安定化に向けた工夫>

ジャイロ効果を活用して2輪車を安定して走行させることは、この競技で最も大きな課題といえます。この点における工夫についての事例を紹介します。

○ジャイロ効果による車体の安定についての考察があった事例

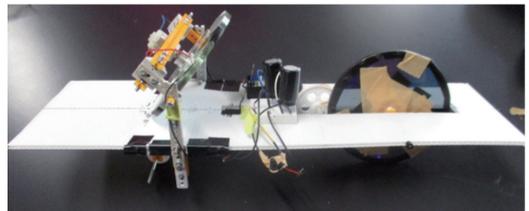
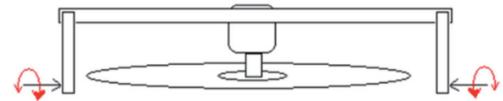
この事例では、車体の安定に必要な要素を示し、ジャイロ機構が示されていました。

[プレゼンシートより抜粋]

－機体の安定に必要な要素－

- ・ジャイロのロール軸の回転が機体に固定されている
- ・ジャイロがピッチ軸に自由に動ける

これらから機体の安定には右上のような機構が必要



そのほか、車輪と変速器についての工夫、コンデンサの接続の工夫についても記載されていました。

○フライホイールを2基搭載した事例

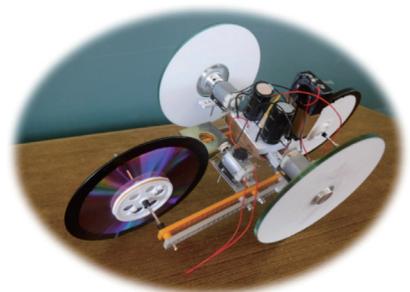
この事例では、フライホイール2基を水平方向に回転軸を取り、ジャイロ機構を製作しています。

[プレゼンシートより抜粋]

この2輪車のジャイロは、本体上部についている。

2枚のフライホイールを回転させることにより、ジャイロ効果を生み出す。その力を利用して、本体の重心をずらすことで姿勢を長い間保つことができる。

そのほか、外枠の強度を上げるためにユニバーサルアームを二重にして利用する、全体を小型軽量化する、などの工夫点も記載されていました。



<手回し発電機によるコンデンサの充電と接続についての工夫>

この競技は、手回し発電機による充電時間を含んだレースです。したがって、レースに必要な電気エネルギーを過不足なく充電することがポイントとなります。この点における工夫についての事例を紹介します。

○実験データに基づき工夫を重ねた事例

この事例では、走行に必要な電力量の確保について実験を重ねた結果をもとに工夫を進めていました。

[プレゼンシートより抜粋]

・発電機の回転速度・回転回数とコンデンサの被充電電圧の関係

	回転回数	50回転	100回転	150回転	200回転	250回転
電圧 (回転頻度 により場 合分け)	1回転/s	0.772V	1.181V	1.486V	1.709V	1.856V
	2回転/s	0.796V	1.364V	1.797V	2.144V	※
	4回転/s	0.698V	1.234V	1.672V	2.046V	※

※規定値の 2.3V を超えると推測されるため、試行を中断した。

考察：一定の速さでの回転，充電ロスを考慮すると，2回転/s で回転させることが最適と考えられる。

・コンデンサの電圧と走行距離の関係

各コンデンサ電圧(必要回転数)	1.5V (160回転)	1.7V (180回転)	1.9V (200回転)	2.1V (220回転)	2.3V (240回転)
直列※	28.10m	18秒88	16秒18	15秒93	15秒23
並列※	-	-	-	-	2.8m

考察：充電時間を考慮すると，180 回転 1.7V 充電が最適と考えられる。

そのほか、「ジャイロの CD の枚数と車体安定性の関係」や「ジャイロの軸固定位置と車体安定性の関係」の実験データに基づく工夫についての記載がありました。

○モーターへの供給電圧を変える工夫を重ねた事例

この事例では、走行の際、スタート時にモーターに供給する電圧と一定の速さに達した時にモーターに供給する電圧を切り替える工夫がなされていました。

[プレゼンシートより抜粋]

[スタート時]

コンデンサ→直列

はじめ加速するために電圧が必要なため

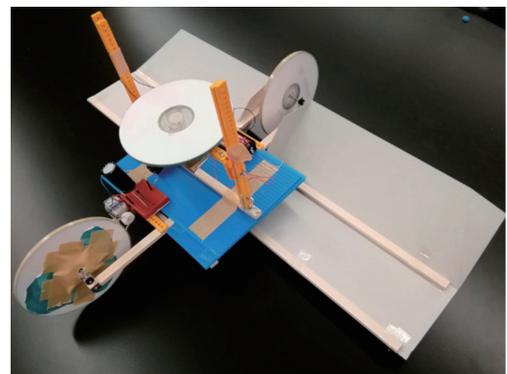
[速さが最大になったとき]

コンデンサ→並列に切り替え

貯めた電気を長持ちさせるため

→この切り替えで充電すべき量を最少限に抑える！

スイッチの構造は省略します。



そのほか、翼による揚力とジャイロ機構による車体の安定化や駆動メカニズムの工夫についての記載がありました。

<モーターの回転を車輪に伝える工夫>

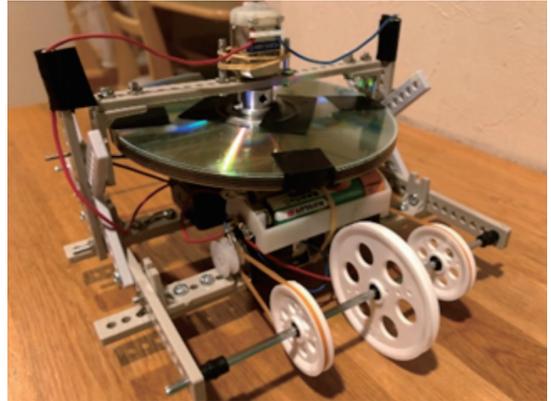
この競技は、電気二重層コンデンサを電源としたモーターの回転で車輪を駆動させ、定められたレールの上を走行するレースです。モーターの回転を車輪に伝える機構の工夫についての事例を紹介します。

○二つのモーターで車輪（プーリー）を駆動する工夫を重ねた事例

この事例では、左右対称に設置した二つのモーターでひとつの車輪を駆動し、安定性を増す工夫がなされていました。

[プレゼンシートより抜粋]

- ・左右対称性を考慮し、左右に2つのプーリー駆動を設置（ツインエンジン）。この結果、車輪のプーリーを小さくしても安定して回転させることができた。
- ・モーターのプーリーを大きいほうに固定し、車輪とのプーリーの大きさとモーターとコンデンサの回路を変えたとき、30 m走行するのにかかった時間（s）を次の表に表す。



実験の結果：モーターは並列，コンデンサは直列，車輪のプーリーはLサイズを利用することとした。

	SS	S	M	L
モータ並列 コンデンサ直列	×	×	19.8	12.5
モータ並列 コンデンサ並列	×	△	27.7	37.6
モータ直列 コンデンサ直列	×	△	28.5	40.2
モータ直列 コンデンサ並列	△	32.4	54.3	△

そのほか、車体を長くして駆動系の重心を下げる、フライホイールの枚数を実験データを元にCD 8枚とする、などの工夫が記載されていました。

○二つのモーターを車輪（プーリー）に直結する工夫をした事例

この事例では、二つのモーターを二つの車輪（プーリー）に直結し駆動力伝達のロスを減少させ、あわせて車体の重心を下げる工夫がなされていました。

[プレゼンシートより抜粋]

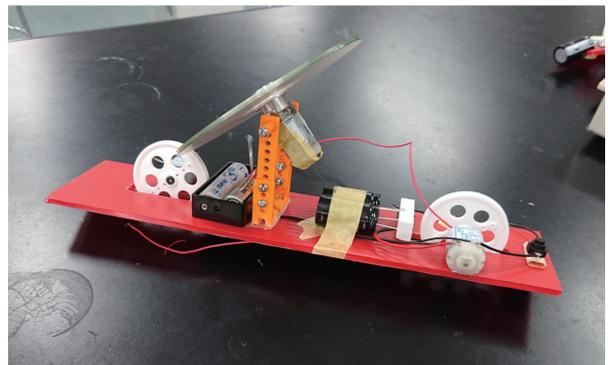
①重心が高い

- プーリーを車輪にし，低重心に
- ⇒安定性の向上

②連結不良

- 車輪にモーターを直結し，ロスを減少

そのほか、車体の軽量化のためにボスをプーリーで代替するなどの工夫について記載がありました。



ここまで、プレゼンシートに見られる各チームの工夫のごく一部の事例を紹介しました。いかがでしたでしょうか？

用意された部品・材料と工具類などを用いて、限られた製作時間でレースに挑んだ48台のジャイロ2輪車は、3月16日の全国大会競技で果敢なレースを繰り広げました。ここで紹介したものから、さらに改良を進め、課題を克服し、より良いジャイロ2輪車となりました。

科学の甲子園はスローガンとして「広げよう科学の輪 活かそう科学の英知」を掲げています。第8回科学の甲子園全国大会の「ツール・ド・さいたまージャイロ2輪車レース」が参加した皆さんにとって楽しく、充実した経験となったことを願ってやみません。

最後になりましたが、この競技の準備・実施にご協力いただいた全ての皆さんに感謝を申し上げます。ありがとうございました。