

模型ロケットを2段式にしよう!!

# ー 2段式模型ロケット ー

本教材は宇宙とのつながりを軸として科学を身近に感じてもらうために作った科学教材です。本教材の利用による事故等については一切責任を持ちかねますので、本教材の利用は、経験のある指導者の指導の下に行ってください。



●教材提供●  
日本宇宙少年団  
福岡分団 麻生 茂氏

2005年3月31日 発行  
2020年10月15日 改訂

★単段式画用紙火薬ロケットの作り方や打ち上げ方については、「画用紙火薬ロケット」をご覧ください。ここでは、その発展的な応用として、2段式ロケットを学びます。

## 目標とねらい

模型ロケットは、本物のロケットと全く同じ原理で飛行します。その意味で「本物」に触れることができる、優れた教材です。ロケットが飛ぶ原理を知り、安定して飛行するための方法を学び、最後に自分で作った模型ロケットが空高く飛翔することで達成感、宇宙への夢を育むことができると思います。単段式の模型ロケットに挑戦した子供達は更に高く飛ばそうと試みます。今回の教材はH-II Aと同様に2段式ロケットです。既に教材化している単段式模型ロケットに付け加えることによって2段式となります。

工作にあたっては、現在の技術では、1段ロケットで人工衛星が地球を回る速度7.9km/sまで速度を上げることができないので、H-II Aロケットのように2段式にして、1段目で速度を上げ、1段目が燃え尽きた後、それを切り離し2段目に点火して更に速度を増すことができることを説明します。

この2段式の模型ロケットは、単段型ロケットと一緒に使います。ここでは2段式の1段目となる模型ロケットの作り方を説明します。

対象学年	小学校高学年以上	所要時間	工作：2～3時間、打ち上げ：5～10分（1回）
------	----------	------	-------------------------

# 1 2 段式模型ロケットの工作

## ●工作に使う材料と道具

### 【ロケット本体の材料】

□バalsa板 (厚さ 3mm、長さ 21cm、幅 5cm) : フィン (尾翼)

\*バalsaはホームセンターなどで入手可能。

□内径 18mm の紙筒 (長さ 6cm) : ロケット本体 (ボディ)

1 段式ロケットも同じもので製作するとよい。

\*内径 18mm の紙筒は日本宇宙少年団福岡分団事務局 (asospace@ybb.ne.jp) で入手可能。あるいは、厚めの紙を外径 18mm の木の丸棒に接着材をつけながら数回巻きつけると作れる。

□単段式ロケット (2 段目のロケットになる。作り方は「画用紙火薬ロケット」ロケット 5-1 ~ 10 ページ参照)

□A 型エンジン (2 段目用、A8-3)、B 型エンジン (1 段目用、B6-0)

### 【打ち上げに使うランチャー (発射台)】

使い易さと安全面から、市販のランチャーを購入する事をお勧めする。

\*ロケット 5-3 ページ「ランチャー、モーターなどの入手問い合わせ先」参照

### 【工具・道具】

(リーダーは刃物や工具の安全な使い方を事前に指導すること)

□カッターナイフ

□机上保護板 (カッターマット、段ボールなど)

□紙ヤスリ

□速乾性接着剤

□セロハンテープ (幅 15mm 以上)

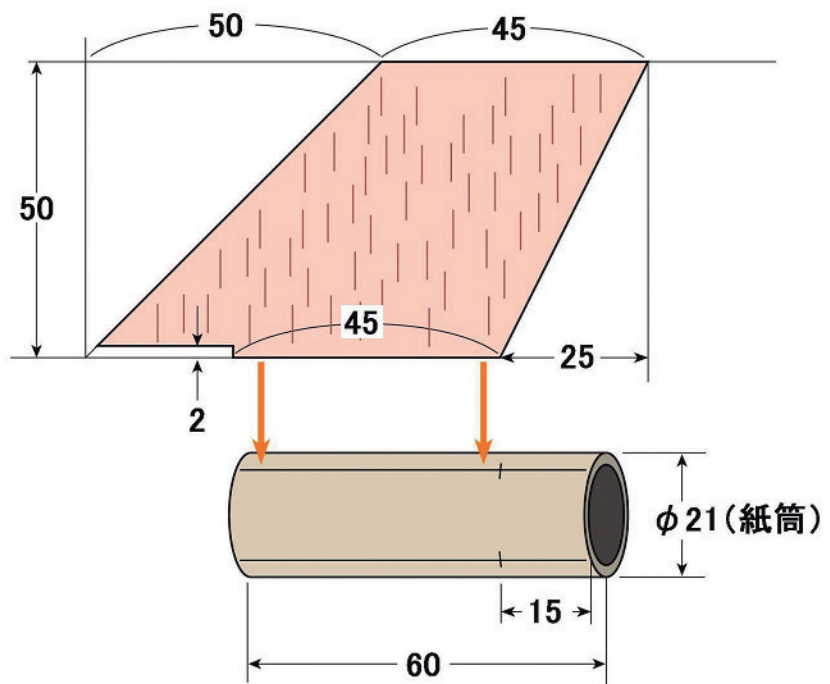
□ビニールテープ (幅 10mm)

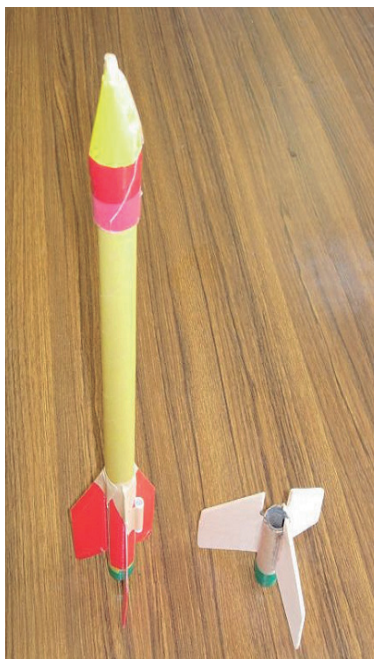
□タコ糸

## ●工作の順序と指導 (2 ~ 3 時間)

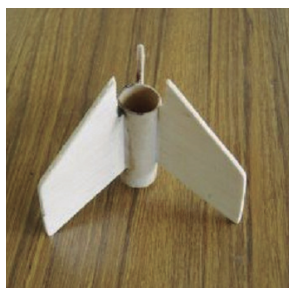
### 1 段目のロケットを作る

- ①バalsa板からフィンを 3 枚切り取る。このとき、バalsa板の木目ができるだけロケットの軸に垂直になるように気をつけると、風を受けたときのフィンの強度が増す。切り取った後にバリ (切り取った線よりはみ出た部分) を取る。とくにフィンを紙筒に取りつける部分は紙ヤスリに押しつけてけずり平滑にする。
- ②紙筒の外周を 3 等分した位置 (フィンの取り付け位置) に線を引く (「画用紙火薬ロケット」のロケット 5-2 ページ③に 3 分割の図があるので参照)。下 (お尻のほう) から 15mm のところに目印をつける。
- ③フィンに速乾性接着剤をたっぷりつけ、本体に予め引いた線に沿って接着する。





2 段目 (左) と 1 段目 (右)



1 段目の機体

## ロケットにエンジンを装着し組み立てる(→右図)

- ① 2 段目用 A 型エンジンと 1 段目用 B 型エンジンをセロハンテープで固定する。このとき、エンジンの向きに注意。どちらのエンジンも、ノズルが下（地上側）にくるようにする。セロハンテープは 1 回だけ巻く。
- ② 2 段目の筒に、①でつけたエンジンを差込み、2 段目のエンジンをビニールテープでしっかりと固定する。ノズルが下（地上側）にくるように差し込む。
- ③ 1 段目のロケットをエンジンの後ろから差し込み、1 段目のエンジンが 1 段目の筒の後端から 10mm 出るようにしてビニールテープで固定する。  
\*このとき、2 段目のフィンの位置と 1 段目のフィンの位置を合わせるようにすると、打ち上げ時に抵抗が少ない。1 段目のエンジンと 2 段目のエンジンの継ぎ目が、ちょうど 1 段目の筒の前端と同じ位置にあることを確認する。
- ④ タコ糸で輪を作り、ロケットを輪に通し水平になるところ（重心）を見つけ、重心位置にタコ糸を固定する。このタコ糸の先端を持ってロケットを約 2～3m の半径でぐるぐる回してみる（ストリングテスト（スウィングテスト））。どのような向きから始めてもロケットの先端が前を向いて飛ぶことを確認する。

- \*確認ができなかったら、ロケットの先端が前を向いて飛ぶまでノーズコーンに油粘土を詰める。



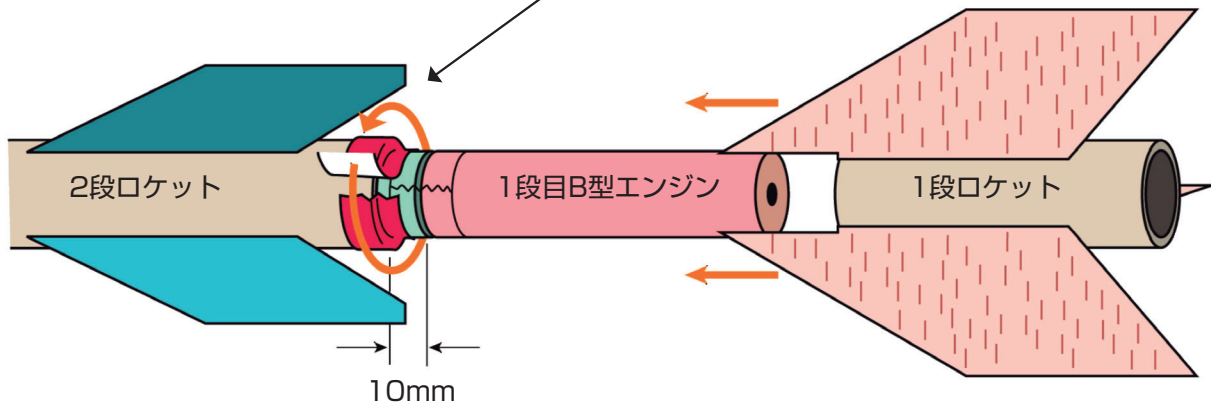
ストリングテスト  
(スウィングテスト)

## 2 段式ロケットの組み立て (単位 mm)

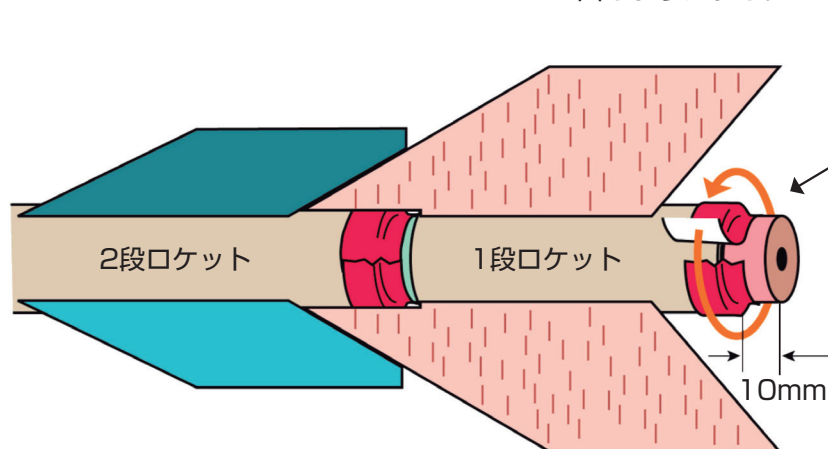
1) 1 段目エンジンと 2 段目エンジンを  
セロハンテープで固定する。



2) 2 段目ロケットに 2 段目エンジンを差込み、ビニールテープで固定する。このとき、一段目 B 型エンジンまで固定してしまわないように十分注意する。



3) 1 段ロケットを後ろから差込み、  
1 段目のエンジンが筒の後ろから  
10mm 出るようにする。ビニールテープで固定

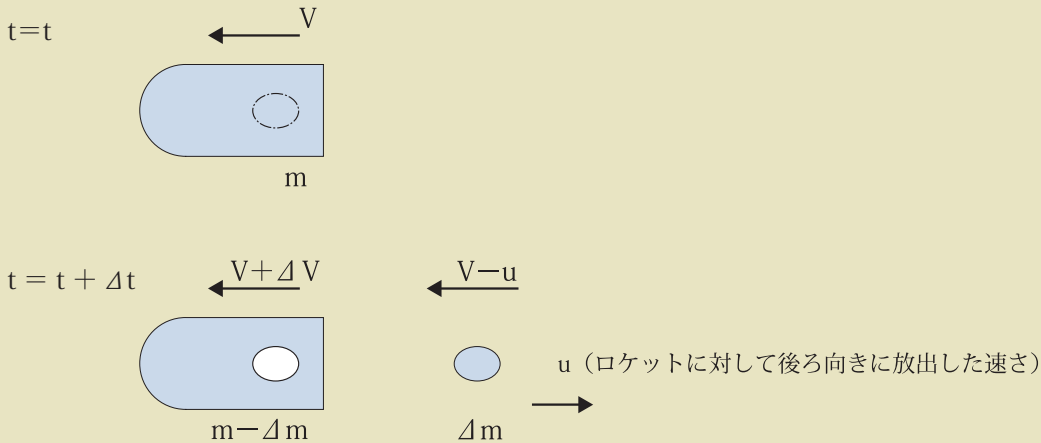


## 2 2 段式模型ロケットの打ち上げ

打ち上げの手順や注意すべき点は、「画用紙火薬ロケット」のロケット 5-6 ~ 9 ページを参照してください。

補足資料 ロケット方程式の導出と意味

時刻  $t = t$  において速さ  $V$  で飛行しているロケット（質量  $m$ ）が、時刻  $t = t + \Delta t$  において推進剤を  $\Delta m$  だけロケットに対して後ろ向きに速さ  $u$  で放出することにより、ロケットの速さが  $V + \Delta V$  になったとする。ここで、ロケットには重力、空気抵抗は働かないと仮定する。



この間、運動量（運動量＝物体の質量 × 速度）は保存されるから

$$mV = (m - \Delta m)(V + \Delta V) + \Delta m(V - u)$$

$$= mV + m\Delta V - V\Delta m - \Delta m \cdot \Delta V + \Delta m \cdot V - \Delta m \cdot u$$

$\Delta m \cdot \Delta V$  を 2 次の微量量として無視すると

$$m\Delta V = u \cdot \Delta m \tag{1}$$

これを微分形で書くと

$$\Delta V = \frac{dV}{dt} \Delta t, \quad \Delta m = -\frac{dm}{dt} \Delta t \quad \left( \frac{dm}{dt} < 0 \text{ より左のように表記することで } \Delta m \text{ は正となる} \right) \text{ より}$$

$$m = \frac{dV}{dt} \Delta t = u \cdot \left( -\frac{dm}{dt} \right) \Delta t$$

$$\therefore m \frac{dV}{dt} = -u \frac{dm}{dt} \tag{2}$$

さらに、次式を得る。

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{u}{m} \frac{dm}{dt}$$

ロケットのエンジンが  $t = 0$  から  $t = t_f$  まで燃焼して推進剤を全て使用したとすると

$$\int_0^{t_f} \frac{dV}{dt} dt = - \int_0^{t_f} \frac{u}{m} \frac{dm}{dt} dt$$

$$\therefore \int_{V(0)}^{V(t_f)} dV = - \int_{m(0)}^{m(t_f)} \frac{u}{m} dm$$

$$\therefore V(t_f) - V(0) = - \int_{m(0)}^{m(t_f)} \frac{u}{m} dm \tag{3}$$

ここで  $V(t_f) - V(0)$  はロケットのエンジンの燃焼開始から燃焼終了までの速度の増分であり、これを  $\Delta Q (= V(t_f) - V(0))$  で表す。

$u = \text{const.}$  とすると

$$\Delta Q = -u \int_{m(0)}^{m(t_f)} \frac{dm}{m} = -u \left[ \ln m \right]_{m(0)}^{m(t_f)}$$

$$\Delta Q = -u (\ln m(t_f) - \ln m(0)) = u (\ln m(0) - \ln m(t_f))$$

$$\Delta Q = u \ln \frac{m(0)}{m(t_f)} \quad (4)$$

※ここで  $\ln$  は、ネイピア数  $e$  を底とする自然対数であり、 $\ln m = \log_e m$  のこと。

この式を**ロケット方程式**という。(ロシアの科学者ツィオルコフスキーが導いたので**ツィオルコフスキー方程式**ともいう) この式の意味は、ロケットのエンジンが燃焼を始めてから燃焼が終わるまでに得たロケットの速さの変化(増速という)  $\Delta Q$  は、ロケットから出ていく質量(燃焼ガス)の速さ  $u$  とロケットのエンジンが燃焼を始める前のロケットの質量  $m(0)$  とロケットのエンジンが燃焼を終了したときの質量  $m(t_f)$  で求められることを示している。

質量比  $\mu = \frac{m(t_f)}{m(0)}$  と定義すると以下のように表される。

$$\Delta Q = u \ln \frac{1}{\mu} \quad (5)$$

ここで  $u$  は、ロケットから出ていく質量(燃焼ガス)のロケットに対する相対速度であるので、ノズル出口での外気圧との圧力差から機体に働く推進力も含んだ有効排気速度  $c$  で表すほうが一般的である。

$$\Delta Q = c \ln \frac{1}{\mu} \quad (6)$$

有効排気速度  $c$  はロケットの性能を表す比推力  $I_{sp}$  と重力加速度  $g$  を用いて  $c = g I_{sp}$  と表されるので、次式を得る。

$$\Delta Q = g I_{sp} \ln \frac{1}{\mu} = g I_{sp} \ln \frac{m(0)}{m(t_f)} \quad (7)$$

つまり、 $Q$  は  $I_{sp}$  と質量比  $\mu = \frac{m(t_f)}{m(0)}$  に関係することがわかる。

それでは1段式のロケットが打ち上げてから得られる速さを求めてみよう。ケロシンを燃料とし、液体酸素を酸化剤とするロケットのエンジンについて  $I_{sp} = 350 \text{ s}$  と仮定し、ロケットの質量比  $\mu$  を  $0.2$  と仮定する。

まず、ロケットの有効排気速度  $c$  は、

$$c = g \times I_{sp} = 9.8 \text{ m/s}^2 \times 350 \text{ sec} = 3430 \text{ m/s}$$

ロケットが静止状態から発射した時にロケットが最終的に得る速さ  $\Delta Q$  は

$$\Delta Q = 3430 \text{ m/s} \times \ln \left( \frac{1}{0.2} \right) = 3430 \text{ m/s} \times 1.6094 = 5520 \text{ m/s}$$

実施には重力の影響、空気の抵抗などで1段目の最終速度はここまで上がらないが、いずれにしても人工衛星が地球に落下しないで地球を回ることができる第1宇宙速度は  $7.9 \text{ km/s} = 7900 \text{ m/s}$  (人工衛星が地表すれすれに飛んだ時に人工衛星になるために必要な速度) と比べると、このロケットは人工衛星を打ち上げることができない。故に、ツィオルコフスキーは1段のロケットでは人工衛星は打ち上げられないと判断した。でも、ツィオルコフスキーはがっかりせずに、どうしたら第1宇宙速度まで加速できるかを考えた。

その答えは、多段式ロケットだった。1段目の推進剤を使い終わったら1段目のロケットを切り離して2段目のロケットのエンジンに点火するとさらに速度を増すことができる。こうやってロケットの段数を増やすと第1宇宙速度以上の速度を達成することができる考えたのである。例えば、2段式のロケットの場合、1段目のロケットも2段式のロケットも、ケロシンを燃料とし、液体酸素を酸化剤とするエンジンであり、これらの比推力  $I_{sp}$  はいずれも  $350 \text{ s}$  と仮定し、1段目を大きくしてロケットの質量比  $\mu$  は  $0.2$  が維持されるものと仮定する。このとき、それぞれ一段ごとにロケットの速さは  $5520 \text{ m/s}$  だけ速くなっていくから2段目では  $5520 \text{ m/s} + 5520 \text{ m/s} = 11040 \text{ m/s} = 11.04 \text{ km/s}$  となり、第一宇宙速度よりも速くなる。実際には重力の影響、空気の抵抗などでロケットは減速されるのでやっと宇宙に行けたか、あるいは3段目が必要になるだろう。

なお、正確には、

$$\Delta Q = c_1 \ln \frac{\text{打ち上げ前の全ての質量}}{\text{打ち上げ前の全ての質量から1段目の推進剤のみを引いた質量}} + c_2 \ln \frac{\text{1段目を切り離れた直後に残ったロケットの全ての質量}}{\text{1段目を切り離れた直後に残ったロケットの全ての質量から2段目の推進剤のみを引いた質量}} + \dots$$

となることに注意する。ここで、 $c_1$ と $c_2$ はそれぞれ1段目、2段目のロケットのエンジンの有効排気速度である。

日本のH-IIA、H-IIBロケットは推進剤として液体水素と液体酸素を使っていて  $I_{sp} = 450$ 秒と高いため、その分ペイロード（宇宙にもっていく質量）を大きくすることができる。

ここで

$$\text{第1宇宙速度 } V_1 = \sqrt{\frac{GM}{a}} = 7.9 \text{ km/s}$$

$$\text{第2宇宙速度 } V_2 = \sqrt{\frac{2GM}{a}} = 11.2 \text{ km/s}$$

$G$ =重力定数、 $M$ =地球質量、 $GM = 3.986 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$ 、 $a = 6378 \text{ km}$

である。

## 参考文献

### 1) 日本モデルロケット協会関連資料

日本モデルロケット協会 〒356-8691 埼玉県ふじみ野市上福岡 1-5-23 青柳ビル 4F  
TEL.049-266-5188 FAX.049-266-5198

2) 「飛ばせ！手作りロケット」日本モデルロケット協会編、誠文堂新光社

3) 「水ロケットを飛ばそう」片岡鉄雄・竹前俊昭・福田研一・吉田譲共著、日刊工業新聞社

4) 「宇宙をめざすきみへⅠ・Ⅱ」（宇宙開発事業団発行、財団法人日本宇宙少年団制作）

5) 「モデルロケット入門」（ラジコン技術 1993年1月号臨時増刊）電波実験社

6) 刃物及び工具類の使い方（日本宇宙少年団教材検討グループ編）

7) 危険予知訓練（下記文献等を参考に各団体で訓練を実施して下さい）

i. 社団法人全国子ども会連合会 発行

「こうしてすすめよう！子ども会 KYT」（執筆・シート絵：伊藤昭彦）

「こうしてすすめよう！子ども会 KYT-2 みつけたキケンくん」（イラスト：伊藤昭彦／菊谷礼子）

\*社団法人全国子ども会連合会

本の杜「FAX サービス」FAX.03-3220-1829

または社団法人全国子ども会連合会事業開発部（東京都文京区大塚 6-1-14）へ。

ii. 中央労働災害防止協会 発行

「KYT4 ラウンド法 イラスト・シート集②」

「短時間 KYT イラスト・シート集②」

iii. 労働基準調査会 編著

「安全作業シート集」

iv. ボーイスカウト愛媛県連盟・健康安全委員会 発行

「スカウトの安全 危険予知トレーニングシート」他

\*財団法人ボーイスカウト連盟〈スカウト用品販売店一覧〉

<http://www.scout.or.jp/scoutshop/shoplist.html>

科学する心を  
育てよう

- ①ロケットの進む原理を説明するにあたって、こんな問いかけをしてみよう。「ふくらませた風船の口を放すと、どうして風船が前に飛んで行くのかな?」「風船を膨らませたときに入れた空気はどこにいったのだろう」ロケット推進は、基本的には後ろにものを出したらその反動で前にすすむものだとわかればよい。
- ②現在の技術では、単段式のロケットでは人工衛星が地球を回る速度 7.9km/s まで速度を上げることができない。そこで、H-II A ロケットのように 2 段式にして、1 段目で速度を上げ、それが燃え尽きたら切り離し、2 段目に点火してさらに速度を増していることを説明しよう。

安全対策

- ①火薬を使うロケットの発射は、必ず経験のある指導者が行う。この場合、A 型及び B 型のエンジンを使うことになるので、日本モデルロケット協会の 4 級ライセンスを取ることが望ましい。B 型エンジン以上の使用にあたっては、エンジンの種類によって 3 級ライセンス以上が必要である。
- ②工作の基本的な注意事項や打上げ時の注意事項は、その活動を始める前の落ち着いた状態で参加者及びリーダー・指導者全員で確認し合う。必要な場合は保護者にも協力を呼びかける。
- ③打ち上げ手順を必ず守る。
- ④リーダーは“限界”や“異常事態”を知っておく。
  - ア. モーター（火薬エンジン）の危険性（点火、燃焼、点火不良、燃焼不良ほか）
  - イ. 破裂や落下機体に当たったときの衝撃を防ぐ→ヘルメット  
破裂時の音・破片を防ぐ→耳栓・ゴーグル
  - ウ. 飛行不安定機体及び部品の飛散から守る→打ち上げ場の広さを確保
- ⑤そもそも危険が伴っていることをよく認識しておく
  - ア. 火薬を扱っている。（火薬取締法）
  - イ. 高速で飛ぶ。
  - ウ. 高いところから落下してくる。
  - エ. 当事者以外は誰も安全を保証してくれない。
  - オ. 事故が発生しても誰も損害を補償してくれない。
  - カ. 自主自律、自己責任の活動であることをしっかり認識することが必要である。
- ⑥火薬の恐ろしさを認識しておく。
  - ア. 突然の発火が起こりうる。
  - イ. 火傷の危険性がある。
  - ウ. 暴発の危険性がある。
- ⑦打ち上げ時には必ず管制官を配置する。  
子どもたちの安全確保のためには、安全管理責任者を決めてバラバラではなく一元化された状態で運営することが大切。そのため、安全確保のために訓練された管制官が必要である。
- ⑧火薬を使うロケットならではの安全対策
  - ア. 発射台をクイで固定し、垂直から 30 度以上傾けない。
  - イ. 発射台の近くには消火器か水バケツを用意する。
  - ウ. モーター、イグナイターは金属製のもの以外の箱に別々に保管する。
  - エ. モーターに傷やヒビがないか調べて、不良品は使用しない。
  - オ. モーターの近くで火気を使わない。
  - カ. モーターの置き場所は発射台から 20m 離すこと。
  - キ. 発射台には、一回の打ち上げに使うロケットモーター以外は持ち込まない。
  - ク. モーターの置き場所は、打ち上げ関係者以外は立ち入り禁止にする。
  - ケ. モーターを盗まれないようにする。
  - コ. 強風や雨、雷の時には打ち上げない。

学習指導要領  
との関連

小学校	3年	理科（粒子）	物と重さ
小学校	6年	理科（粒子）	燃焼の仕組み
中学校	1年	理科（エネルギー）	力と圧力
中学校	2年	理科（粒子）	化学変化
中学校	3年	理科（エネルギー）	運動の規則性
中学校	3年	理科（エネルギー）	力学的エネルギー
中学校	3年	理科（エネルギー・粒子）	科学技術の発展
小学校	4年	算数（量と測定）	角の大きさの単位
小学校	5年	算数（図形）	角柱、円柱

キーワード 加速度・加速度計・宇宙への出発時・反対向きの力・ロケット

教材提供 : 日本宇宙少年団福岡分団 麻生茂氏  
発行 : 宇宙航空研究開発機構 宇宙教育センター

協力 : 財団法人日本宇宙少年団 YAC 株式会社学習研究社  
©JAXA2013 無断転載を禁じます