



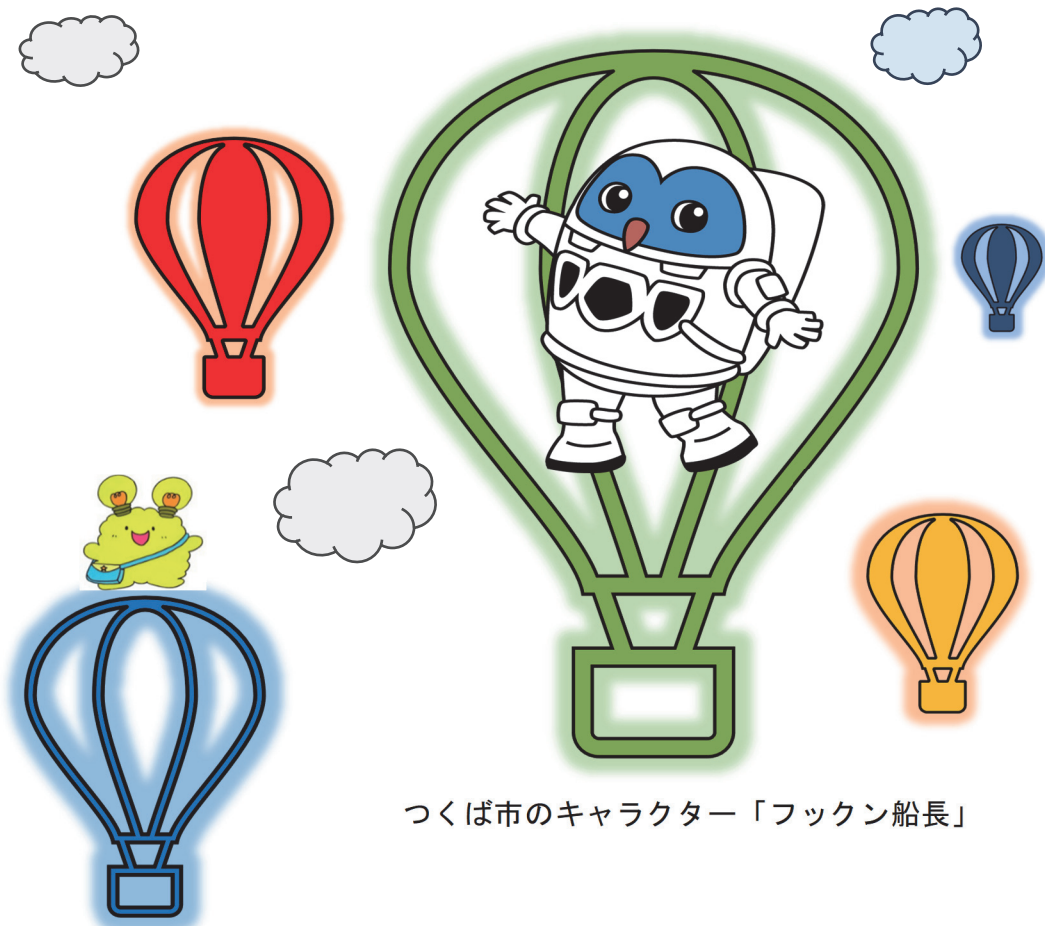
第13回
科学の甲子園 全国大会

実技競技③

バルーンフェスタ in つくば

熱気球の昇降運動を科学せよ！

解 説



つくば市のキャラクター「フックン船長」

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（総合）では、身近な現象や技術を利用して駆動する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。科学者は、未知の領域や未踏な場所へ進みゆくとき、考え得る適切な理論であらゆる状況に対応するべく、分かっている知識で手元にある実機を制御可能にして、挑戦します。

そこで今年の課題では、競技会場を未知の場所とし、当日にならないと分からない環境パラメーターに即時対応できるよう、各高校が試行データを基に滞空時間をコントロールできる熱気球を製作することを目標に設定しました。

熱気球の運動の基本原理自体は非常にシンプルであり、高校の物理の学習範囲で理解できるものですが、現実では熱の流出による温度変化や熱気球の形状変化があり、材質や質量、熱風を入れる時間でも運動は変化し、単純に計算できるものではないと気付いたことでしょう。

そこで必要になるのが、「理論」・「実験」・「シミュレーション」の3つです。「理論」は動作原理ですが、現実には即した式あるいはモデルを立てなくてはなりません。「実験」は、理論に含まれるパラメーターやモデル自体の正しさを決定するために必要です。そして「シミュレーション」は、様々な環境パラメーターでの挙動を予想するために必要となります。これらの3つの手法を適切に使いこなして、いかに事前の試行から大会当日の競技へとつなげられるかが、本競技の本質となります。

2. 本競技に使用する熱気球における運動の基本原理

機体の運動は、時間を t とし、機体にかかる力を $F(t)$ としたとき、基本的な要素を入れた

$$F(t) = \text{重力 } F_G(t) + \text{空気抵抗 } F_R(v(t)) + \text{浮力 } F_B(t)$$

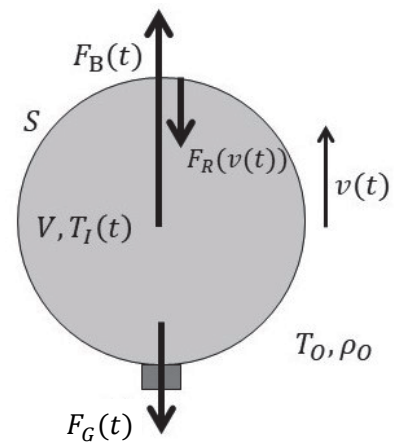
を用いたシミュレーション（数値計算）から予測できます。

「重力」は製作した機体自体や搭載するおもりの質量 M 、そして熱気球内の空気の質量 $m(T_I(t))$ で決まります。「空気抵抗」では、 $v(t)$ や $v^2(t)$ に比例する係数が未知であり、機体の形状から理論計算するか、熱気球内外の温度が等しい状況での自由落下の実験データから求めてもよいでしょう。「浮力」は、機体が押し上げた空気の質量で計算できます。

熱気球内温度 $T_I(t)$ の時間変化は、一例として以下の微分方程式

$$\begin{aligned} \frac{dT_I(t)}{dt} &= \frac{[(\text{放射で流出する熱量}) + (\text{熱伝達で流出する熱量})]}{C_V V} \\ &= \frac{[\varepsilon\sigma(T_0^4 - T_I^4(t)) + C(T_0 - T_I(t))]S}{C_V V} \end{aligned}$$

で計算できます。 S は熱気球の表面積、 C_V は空気の定積比熱、 ε は放射率、 σ はステファン・ボルツマン定数、 C は熱伝達係数です。特に ε は材質や表面状態などに依存し、アルミ蒸着面が内側か外側かで大きく異なります。アルミの放射率は0.05程度であり、ほとんど無視できます。したがって、アルミ蒸着面を外側にすると放射による熱流出が抑えられ、熱気球内温度を高く保持することができます（3. (A) 参照）。 C は材質や機体の形状に依存する未知のパラ



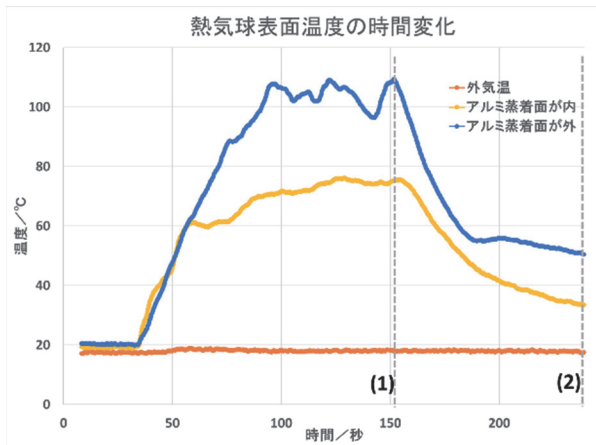
メーターですが、材質の特徴を理解し、計算しやすい形状にすれば、設計段階である程度、値を制御することができます。円形に近いと3前後になるでしょう。

上式はもちろん完全ではなく、熱伝達モデルの正確性（3. (B) 参照）、 $T_I(t)$ の一様な温度分布という仮定の妥当性（3. (C) 参照）、といった理論的不定性も考慮しなくてはなりません。完璧でなくとも大まかな運動を予想できる適切な簡易モデルを探し出すのも、科学の醍醐味です。

3. 熱気球の昇降運動に大きく影響するパラメーター

(A) アルミ蒸着シートの表裏

アルミ蒸着面を外側にするか内側にするかで、熱気球内の温度を保持する力にどの程度違いが出るか、データを見てみましょう。競技で使ったアルミ蒸着シート1枚を半分に切り、それぞれアルミ蒸着面を内と外にして枕状の熱気球を製作しました。ヒートガン（強）で2分間熱風を入れ、熱気球中央付近をサーミスタで測定しつつ、サーモグラフィでも撮影してみました。



左図は、熱気球表面温度の時間変化のグラフです。(1)の点線がヒートガンを切った時間、(2)の点線が切ってから90秒後です。アルミ蒸着面を外側にした方が明らかに温度が上がり、その後の温度低下も抑えられているのが分かります。

一方、右の写真はサーモグラフィでの撮影画像です。アルミ蒸着面が外側の場合、温度が実際の表面温度より低く表示されています。これは、アルミの輻射率が小さいため、赤外線を対象の温度を計算するサーモグラフィでは正しく測定できないためです。アルミ蒸着面が内側の場合は、外側は樹脂になるのでサーモグラフィで正しく温度が表示されています。

一見矛盾しているように見えますが、アルミ蒸着面を外側にした方が輻射が抑えられ、その分実際には熱気球内の温度が高くなり、温度低下も緩やかになっていることを示しています。

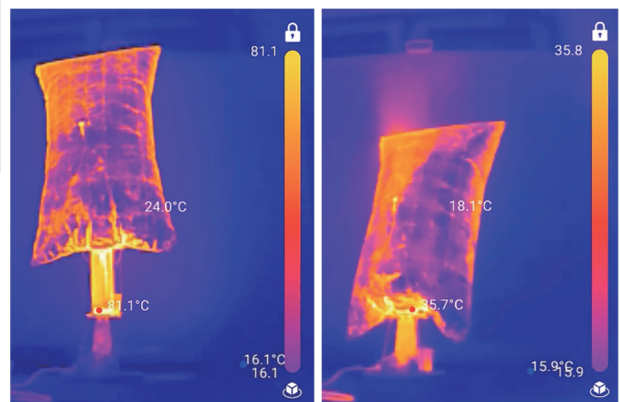


図1 アルミ面外 (1)時点 図2 アルミ面外 (2)時点

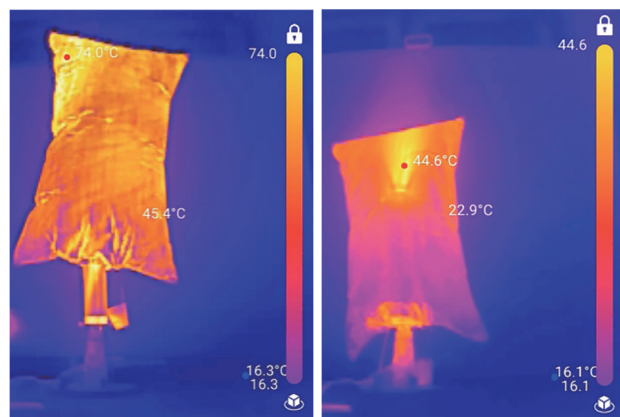


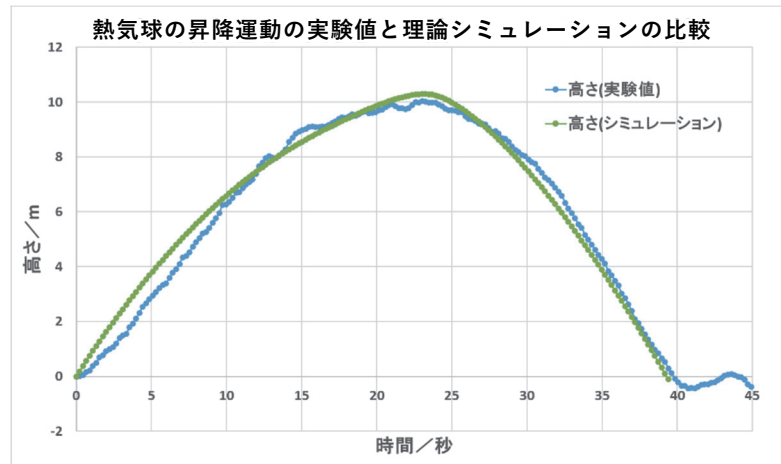
図3 アルミ面内 (1)時点 図4 アルミ面内 (2)時点

(B) 積載重量や気流による熱気球の昇降運動への影響

熱気球の形状は、滞空中に刻々と変化しています。積載重量が大きい場合、熱気球内の温度が低下していくと、その重量で熱気球下部が引っ張られてしぼんでしまいます。こうなると空気抵抗が小さくなり、下降速度が速くなる傾向があります。

また、熱気球表面を流れる相対的な気流速度が、下降時の方が速いため、より早く温度が低下し、僅かですが加速度的に落下速度が増していきます。

右図は、熱気球に 12g のおもりを載せたときの昇降運動の様子です。グラフが左右対称になっておらず、下降の方が時間が短いことが見て取れます。上記の影響を考慮した簡易的な理論モデルを構築し、実験値を再現するようにパラメーターを調整したシミュレーションを作っておけば、その場で与えられた環境や滞空時間から、適切な積載重量と熱風導入時間を即座に計算できるでしょう。



(C) 熱気球内温度の推定

熱気球の昇降運動に最も影響を与えるパラメーターが、熱気球内の温度です。どのようにすればより正確に測定できるのでしょうか？ 熱気球内部にセンサーをぶら下げるのも不安定ですし、そもそも一様な温度ではないでしょう。しかし、理論的には effective に一様な温度としても問題はないので、どこかで測定した値から推定するしかありません。例えば、熱気球の上部、中部、下部の平均温度を取り、その実測値と実際の運動と理論から逆算した推定値の対応表を作っておくと、競技会場で滞空時間をより精細に制御できたかもしれません。

4. まとめ

熱気球の運動に影響を与える不確定要素は、他にもあったことでしょう。しかし、この要素の影響が大きいため、しっかりデータを取っておこう、代わりにこのパラメーターを使って影響を小さくしよう、などの対策を取ることも、非常に有用な科学的思考力です。

実技競技③はレースの要素が強く、総合競技であるがゆえに順位には重みがあると思います。しかし、順位以外に大切なものもあります。競技の意図・本質を理解し、皆さんが競技を通して何を得られたのか、振り返りも大切にしていきたいと思います。