

自由気球の飛行経路予測プログラムの開発

Development for the flight path prediction application for a free balloon

村橋究理基（株式会社岩谷技研）

櫻井 雅也（株式会社岩谷技研）

棧敷 和弥（株式会社岩谷技研）

岩谷 圭介（株式会社岩谷技研）

概要

株式会社岩谷技研ではヘリウムガスを使った自由気球によって、宇宙を目指した有人の高高度気球の開発を進めている。気球に載せた観測機器等や搭乗者を迅速に回収するために気球の飛行経路を正確に予測することが重要である。著者らはケンブリッジ大にて開発され High Altitude Ballooning Tools Hub で公開されていた経路予測プログラムを参考に、自社製気球の飛行経路を予測するプログラムを開発した。従前のプログラムにおいて考慮されていなかった上昇速度の変化を計算するなど、より正確な経路予測を目指している。

1. はじめに

当社ではヘリウムガスを用いた高高度自由気球による有人宇宙旅行の実現を目指して研究開発を行っている。気球の飛行特性や人が搭乗するキャビンの状態などを計測するために様々な計測機器などを搭載しており、それらを回収するため気球がどこに到着するのか正確に把握することが重要である。また将来的に目指している自社製のプラスチック気球による有人飛行においては安全な場所に着地させ、速やかに搭乗者を回収するため、事前に到着地や飛行時間などを把握し、回収する準備や計画を整えておく必要がある。すなわち、気球の到着場所と到着時刻を予測することが重要となっている。上記目的を達成するために予測したい点として一つは安全な場所に着地できるかという点、もう一つは現実的に回収に向かうことができる場所及び時間に着地す

るかという点がある。

自由気球の経路を予測するための既存のプログラムとしてケンブリッジ大で開発された Cambridge University Space Flight Landing Predictor 2.5 を用いて High Altitude Ballooning tools Hub (HabHub) にて公開されているものがある。しかし HabHub による予測プログラムにはいくつか問題点がある。一つは上昇速度一定な点である。当社でこれまでに打ち上げた気球の飛行データを確認したところ、上昇速度は一定ではなく、徐々に加速するケースが多いことがわかった。そのため、より現実的な経路予測のためには上昇速度を変化させる必要がある。一つは過去の予測結果を出すことができない点である。HabHub のサービスはウェブ上で公開されている（2022年9月にサービス終了）が、常に現在時刻以降しか予測することができない。このた

め、実際に打ち上げた飛翔データを元に気球の飛行特性を検証・検討することが困難であった。これらの問題を解消するため、自社で気球経路予測プログラムの開発を行った。まず今回はゴム気球を想定したプログラムを開発した。

2. 経路予測のための気象データ補完方法

自由気球は移動経路を能動的にコントロールすることはできず、その移動経路は風速分布に従うと考えられる。HabHub が用いている方法と同様にアメリカ海洋大気庁 (National Oceanic and Atmospheric Administration; NOAA) が毎日 6 時間おきに発行している 2 週間予報の再解析による気象データを用いる。気象の上昇下降速度と組み合わせて経路予測を行う。提供されている気象データは時間的、空間的に離散化されたデータであるため、気球の位置に合わせて適切に補完する必要がある。

用いる変数は東西風速、南北風速、気圧高度、温度の 4 変数である。気象データの空間解像度は水平方向には緯度経度方向に 0.25 度である。鉛直方向には気圧座標が使われており、解像度は地表付近では 25 hPa、上層になるにしたがって細くなり最終的には数 hPa ほどとなる。下端は 1000 hPa (高度 100 m 程度) で、本プログラムで使用する気圧の上端は 1 hPa である。また高度 10 m のデータを地表面付近の条件として用いる。当社で想定している気球の飛翔範囲は水平方向に数 km から数十 km 程度である。緯度経度では日本近郊の場合、0.25 度でおよそ 20 km から 30 km 弱であり、数点程度の格子点の中を移動することになる。したがって格子点間のデータを得るた

め数値補完をする必要がある。

気球の緯度経度高度の 3 次元座標 (気球座標) 点を内包する位置のデータ点 ($G_{B1} - G_{B4}, G_{T1} - G_{T4}$) を用いて計算を行う。気球座標とデータ点の座標との位置関係を示した模式図を 図 1 に示す。

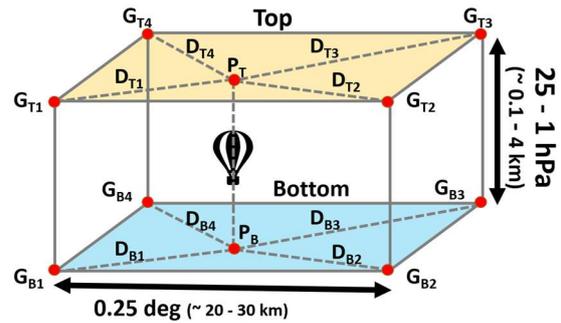


図 1 予測する際の気球位置とデータ点の位置の模式図

気球は時刻に応じて移動するため、そのたびに逐次計算を実行する。データの補完は次に示す手順で行う。

1. 上面側 (Top) と下面側 (Bottom) に気球の水平座標を投影した点 (P_T, P_B) から各データ点との距離 ($D_{Ti}, D_{Bi}; i = 1 - 4$) を計算
2. Top と Bottom それぞれにおける D_{Ti}, D_{Bi} を用いた値 V を重みづけ補完で計算 (下記は Top のみの式)

$$V(P_T) = \sum_{i=1}^4 \frac{V(G_{Ti})}{D_{Ti} W_T}, \left(W_T = \sum_{i=1}^4 \frac{1}{D_{Ti}} \right).$$
3. P_T と P_B の想定高度をそれぞれ Top と Bottom に属するデータグリッドの高さの平均で計算
4. P_T と P_B の高度と気球の高度を用いて $V(P_T), V(P_B)$ を線形補完して計算すなわち水平方向には 4 点による距離に応じた重みづけ補完を行い、鉛直方向には 2 点の線形補完を行う。

時間方向について NOAA の再解析デー

夕は 3 時間ごとの予報を出している。想定している気球の飛行時間は 1 時間から 3 時間程度であるので、飛行時刻を含む前後の時間のデータを使ってそれぞれ空間補完を行い、それを時間方向に線形補完を行うことで任意時刻のデータを計算している。

3. 経路予測のための上昇速度計算

これまで当社で実施してきたゴム気球の放球実験から気球の上昇速度は一定ではなく、徐々に増加する場合があることがわかっている。例えば 2022 年 7 月 12 日に宮城県南相馬市で実施した実験（南相馬実験）では上昇速度が放球直後 10 分平均では 6.8 m/s であり、破裂直前 10 分平均では 9.3 m/s であった。また上昇中全体の平均速度は 7.9 m/s であった。高度が上がるにしたがっておよそ 30% ほど上昇速度が変化していることになる。同実験における時間と高度の関係について 図 2 に示す。

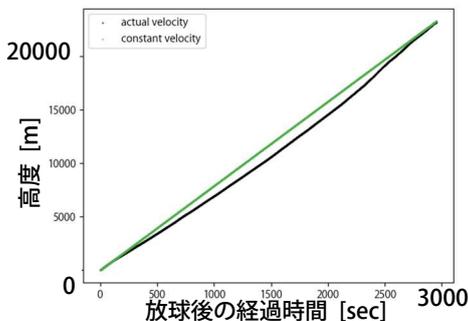


図 2 放球後の経過時間に対する実際の高度変化（黒）と上昇速度の平均値を用いた高度変化（緑）グラフ

全体の平均速度による一定の高度変化（緑線）に比べ、実際の高度変化（黒線）の方が弓なりに下がっており、高度が上がるにつれて上昇速度が速くなっている。

他の条件と比較した結果、上昇速度の変化傾向は高度変化に伴う気温変化と非常に

高い逆相関を持っていることがわかった。高度が高いほど温度が低くなることを考慮し、南相馬実験における上昇速度の時間変化と温度の逆数の時間変化のグラフを図 3 に示す。この結果において気温変化の逆数と速度変化との相関係数を求めると 0.93 を示した。

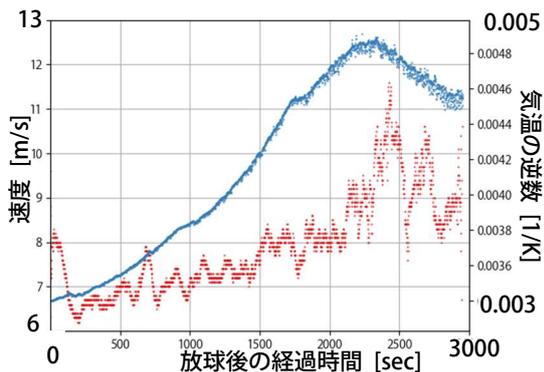


図 3 放球後の経過時間に対する上昇速度（青）と気温の逆数（赤）の変化グラフ

この結果から気球が位置する高度における気温の逆数 $1/T$ [K⁻¹] を地表気温の逆数 $1/T_s$ [K⁻¹] で正規化したものを初期上昇速度 v_i [m/s] に乗ずることで上昇速度変化の変化を再現することができた。すなわち上昇速度 v は次の式で求める。

$$v = v_i \frac{1/T}{1/T_s} = v_i \frac{T_s}{T}$$

再現した結果を図 4 に示す。

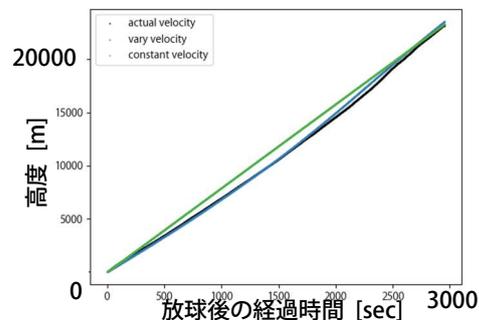


図 4 放球後の経過時間に対する図 2 のグラフに気温による速度変化を考慮した高度変化（青）を重ねたグラフ

4. 経路予測のため降下速度計算

気球破裂後の降下速度 v [m/s] は HabHub のものを参考に終端速度 v_r [m/s] に向けて漸近するものを採用している。

$$v = v_t \frac{1.1045}{\sqrt{\rho}}$$

ここで ρ は気球が位置する高度における大気密度 [kg/m³] である。パラシュートによる抗力が大気密度によって変化することを考慮している。

5. 経路予測の実行とデータの保存

経路予測プログラムは GUI によって予測から結果表示まで実行することができる。実行結果の例を図 5 に示す。

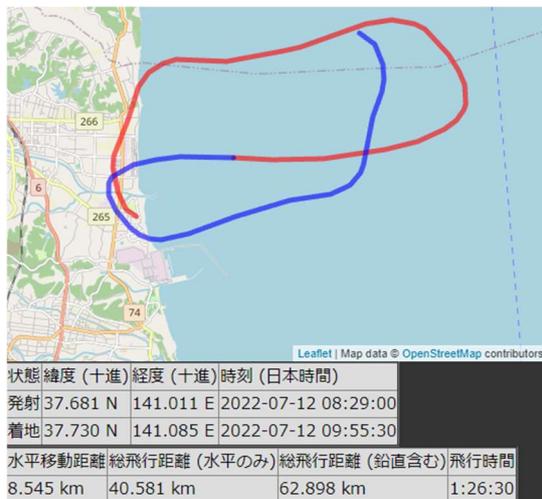


図 5 経路予測結果の例。赤線が示すのが上昇中の経路、青線が示すのが下降中の経路
JavaScript によってウェブブラウザを介して表示できるほか、高さ方向を含めた 3 次元の KML ファイルによる飛行経路表示や経路のデータを CSV ファイルに書き出すことができる。経路予測に使う気象データはウェブを通じて随時取得するほか、あらかじめ指定した領域のデータを必要に応

じてローカルに保存し、オフラインでも経路予測することが可能となった。

6. まとめと今後の展望

高高度気球による有人飛行を目指し、飛行の計画や着地後の速やかな回収のために気球の飛行経路予測プログラムを作成した。これまでの実験結果を元に気球の上昇速度を変化させる仕組みを導入し、より正確に飛行経路を予測することができるようになった。気象データをローカルに保存することでオフライン環境でも経路予測することが可能となった。

今後はゴム気球だけではなく、プラスチック気球を想定した上昇下降速度を計算することを目指す。今回、初期速度や終端速度の設定は経験によるところが大きい。気球に搭載するペイロードや充填するヘリウムガス量に応じて速度を計算できるようにしたい。

7. 参考文献

[1] Cambridge University Spaceflight (2009), CUSF Standalone Predictor - Version 2, <https://github.com/jonsowman/cusf-standalone-predictor>

[2] Gai et al. (2014), A Scientific Mission Based on a High Altitude Stratospheric Balloon, *International Journal of Aerospace Sciences*, 3(1), 18-29

[3] 今井 (1954), 気球の上昇速度について, *気象集誌 第2輯*, 32 巻 7-8 号, 183-191