

大型排気弁の地上試験と性能評価

井筒直樹, 松坂幸彦, 飯嶋一征, 池田忠作, 植本有海, 梯 友哉
小財正義, 齋藤芳隆, 田村 誠, 濱田 要, 福家英之, 吉田哲也
宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

Ground test and performance evaluation of a large exhaust valve

Naoki Izutsu, Yukihiko Matsuzaka, Issei Iijima, Chusaku Ikeda, Arimi Uemoto, Yuya Kakehashi,
Masayoshi Kozai, Yoshitaka Saito, Makoto Tamura, Kaname Hamada, Hideyuki Fuke, and Tetsuya Yoshida
Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency

1 はじめに

排気弁は、気球の頭部に装着され、気球内部の浮揚ガスを放出することによって浮力を減少させる機能を持ち、バラスト投下装置と合わせて、飛翔制御を行うための重要な機器である。現在使用されている排気弁は、1970年代に開発され[1]飛翔実績を重ねてきた。しかし、近年の気球の大型化やゴンドラの大重量化に伴い、特に水平浮遊時に使用する際、短時間で高度を変化させるのに必要な排気量がないことが指摘されていた。そこで、排気量を増大させた大型排気弁を開発し[2]、実際の気球を使用した排気量測定試験を実施した。

本報告では、まず、現在使用している排気弁の排気量測定試験の結果について述べ、実際の飛翔時の排気弁使用例を示す。次に、大型排気弁の排気量を取得するための地上試験とその結果について述べる。最後に、気球の飛翔制御を行う際の大型排気弁の性能を評価する。

2 排気弁の目的と標準排気弁の排気量

排気弁は、気球頭部金具に取り付けられ、コマンドで開閉を行うことにより、気球内部のガスを放出する機能を持っている。国内の気球実験(大樹航空宇宙実験場から放球する場合)を念頭におくと、排気弁の目的は以下に示す通りである。

- (1) 最近の数値気象予報の発展に伴い、予測精度が高く風速の速い偏西風高度(10~15km)を上昇中に、浮揚ガスを抜いて、上昇速度を減少させる(または0にする)ことにより、気球を短時間で東の沖合の最適な位置まで出す。その結果、レベル高度において観測に必要な浮遊時間を確保する。
- (2) レベル高度到達後に、安全・確実な回収を行うのに適した方向に気球を進行させるために、高度を変更する(下げる)ことにより、より良い方向の風をとらえる。
- (3) レベル高度到達後に、特殊な観測または実験のために、気球をゆっくり降下させる。
- (4) 気球切り離し時に、排気弁を全開にして、気球の確実な降下を担保する。
- (5) 緊急時に浮揚ガスの放出を行う。例えば、ガス入れ後の放球中止などが考えられる。

現在の排気弁(以後、現在使用している排気弁を標準排気弁と呼ぶことにする)による排気量 F は、

$$F(\text{kg/min}) = 40(W/150)^{1/6}(P/1013)^{5/6} \quad (1)$$

により求めていた[3]。ここで、 W は総浮力(kg)、 P は気圧(hPa)である。

この式を検証するための地上試験を2012年6月に大樹航空宇宙実験場で実施している。この試験では、満膨張容積 $2,000\text{m}^3$ の気球に、総浮力 185kg のヘリウムガスを入れ、排気弁の開閉を3回繰り返して、気球尾部にかかる張力の時間変化をロードセルにより計測した(図1左)。電圧、電流は、12V、100mA、開閉時間は23秒である。張力の変化率(図1右)は浮力の変化率すなわち排気量を表すので、浮力に対する排気量をフィッティングした結果、図2に示すように、以下の式を得ている。

$$F(\text{kg/min}) = 37(W/150)^{1.2/6}(P/1013)^{5/6} \quad (2)$$

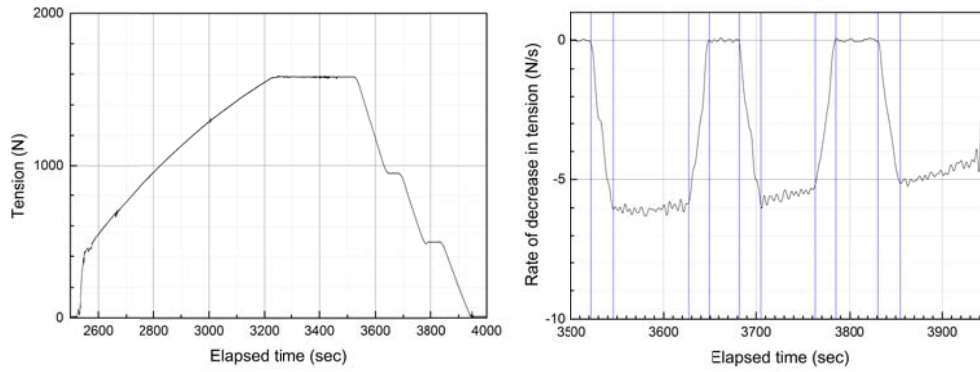


図1 張力の時間変化(左)と張力変動率の時間変化(右)、標準排気弁の実測値

現在は、飛翔運用時の標準排気弁の排気量の計算には、式(2)を用いている。

3 標準排気弁を用いた飛翔制御の例

これまでに大樹航空宇宙実験場で実施してきた気球実験における飛翔制御の結果についての検証を行い、排気量推定式(2)の上空での妥当性は確認している。以下にその代表例を示す。

上昇速度を減少させるためには、1m/s の減速につき、総浮力の 2%のガス放出が必要である[3]。日中は温度上昇があるため、減少させた速度を維持するためにはさらに最大 1%の排気が必要である[3]。高度 13km で排気弁を操作して、上昇速度を 0 にした例を図 3 に示す。排気開始前の総浮力は 994.5kg、自由浮力は 101.7kg、上昇速度は平均 5m/s である。5 分間の排気により、上昇速度は 1m/s 程度まで低下するが、最終的に上昇速度を 0 にするには、その後の 30 分間で断続的に 4.2 分間の排気が必要であった。この結果、式(2)による排気量の積算値は 13.5%となり、従来からの実験値と整合する。

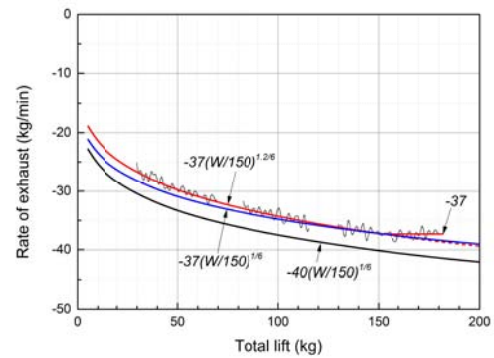


図2 標準排気弁の排気量測定結果

レベル高度から高度を下げるには、降下速度 1m/s につき、総浮力の 4%の初期排気と、高度差 1km ごとに 0.8%の継続排気が必要とされている[3]。図 4 は、レベル高度からの緩降下の例である。降下開始時の総浮力は 735.6kg で、38 分間の排気で降下速度が 1m/s に達しているのがわかる。この間の排気量積算値は式(2)によれば 29.3kg で総浮力の 4%となり実験値と整合する。なお、図 4 の場合、500m の降下には 20 分、1km の降下には 35 分を要する。

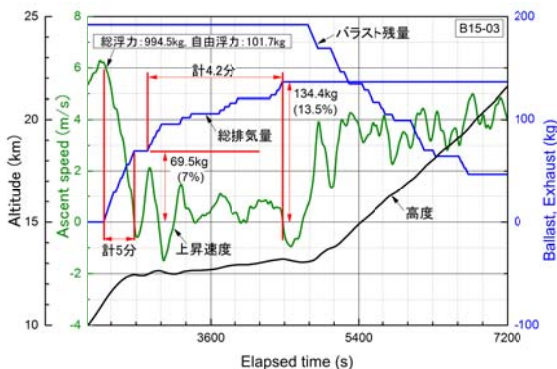


図3 高度 13km における排気弁操作の例(B15-03)

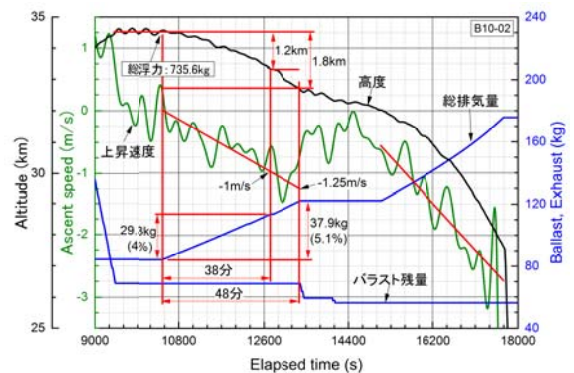


図4 レベル高度における排気弁操作の例(B10-02)

4 大型排気弁の地上試験とその結果

大型排気弁の排気量を測定するための試験を2016年6月10日に大樹航空宇宙実験場の格納庫内で実施した。使用した気球は、満膨張容積 $3,500\text{m}^3$ 、重量 42.38kg 、長さ 29.6m である。これに重量 5.2kg の大型排気弁を取り付け、総浮力 350kg のヘリウムガスで立て上げた(図5上)。気球尾部とアンカーの間にロードセル(共和電業 LUX-B-20kN)を挿入し、排気弁を開いて(図5下)張力の時間変化を計測した(図6)。標準排気弁と同等の時間で開閉できるように、電源電圧は 28V とした(開時間 27.1 秒、閉時間 27.5 秒)。図7(左)に電流の時間変化(サンプリング 100Hz)と、開閉開始時の高速サンプリング(500kHz)の結果を示す。動作時の平均電流は $150\sim 160\text{mA}$ 、最大値は 210mA 程度である。開閉動作開始直後には、図7(右)に示すような最大 2.5A 程度の始動電流を示す。また、閉動作の最終段階の約2秒間は、ばねを引き込む際に定常値の約2倍の平均 300mA 、最大 500mA の電流値を示す。

図6の張力変化率の履歴から、浮力と排気量の関係を求めると、図8に示すように、以下の式が得られた。

$$F(\text{kg}/\text{min}) = 140(W/150)^{1.2/6}(P/1013)^{5/6} \quad (3)$$

開口部の比4にほぼ比例する3.78倍の排気量が得られることがわかった。

5 大型排気弁の性能

5m/s で上昇している気球が、高度 12km と 14km において上昇停止までの要する排気時間を図9に示す。標準排気弁では、B100A型気球(満膨張容積 $100,000\text{m}^3$)で5~9分、B500A型気球(同 $500,000\text{m}^3$)で10~15分要するが、大型排気弁を用いれば約 $1/4$ の時間になる。また、レベル高度において、降下速度が 1m/s に達するまでの所要時間(図10)は、B100A型気球で40分、B500A型気球では150分かかっていたが、これが $1/4$ になれば、B500A型気球でも現在のB100A型気球並みの時間で制御できることを意味する。 500m の降下に要する時間ならこの半分ですむ。これまで、レベル高度到達後は高度を下げるのが事実上不可能だった $300,000\sim 500,000\text{m}^3$ の気球でも高度変更が可能になると考えられる。

大型排気弁は直径が約2倍であるため、弁座の直径がもともと 980mm あるB500A型気球では容易に大型排気弁の装着が可能であるが、B300C型気球(弁座径 700mm)に装着するには、気球頭部の設計変更が必要となる。また、レベル高度で要求される浮遊時間が短い場合には大型排気弁を必要としないため、排気弁を選択できるような弁座の設計にする必要もある。また、B100A型気球では、現在でも高度制御は可能であり、逆に、大型排気弁にすると偏西風高度における応答が過敏になり制御が難しくなる恐れがあり、大型排気弁



図5 大型排気弁の試験(上)、ヘリウム排気中の大型排気弁(下)

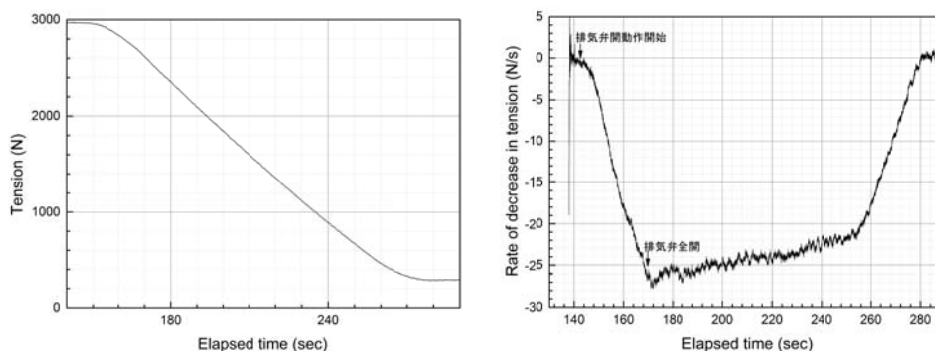


図6 張力の時間変化(左)と張力変動率の時間変化(右)、大型排気弁の実測値

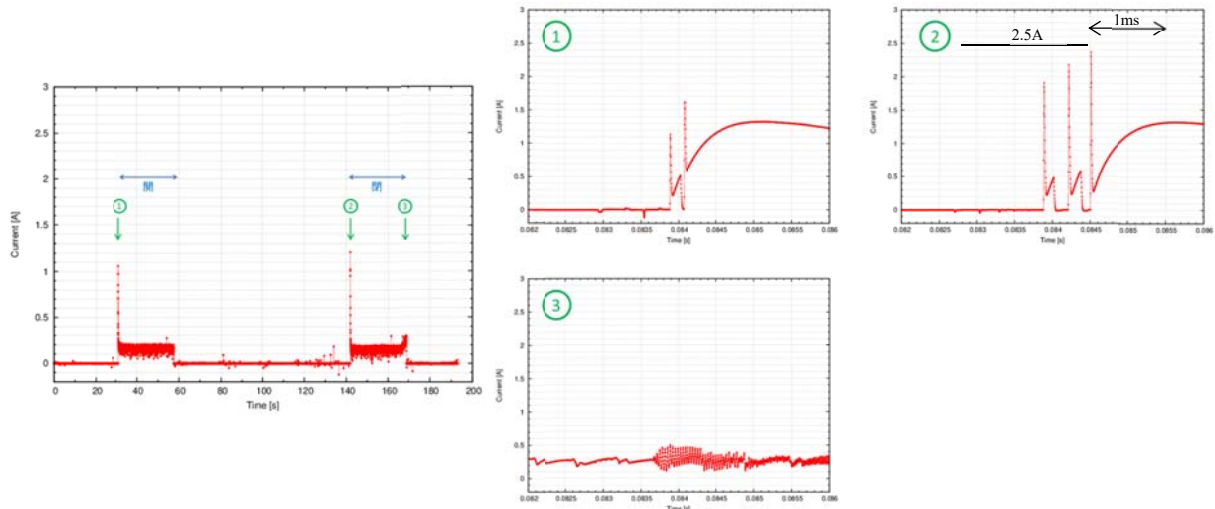


図7 大型排気弁の開閉時の電流、100Hz サンプリング(左)、500kHz サンプリング(右)

の必要性はないと考えられる。なお、大型排気弁を搭載するためには、気球搭載機器に合わせた改良が必要であり[2]、今後の検討課題である。

6 おわりに

現在使用している標準排気弁の排気量計算式の検証を行い、新規に開発した大型排気弁の排気量を測定するための地上試験を実施した。その結果、開口部にはほぼ比例する、標準排気弁の3.78倍の排気量が得られた。大型排気弁を使用すれば、容積 300,000 ~ 500,000m³ の気球に対しても、有効な高度制御が可能になる。ただし、気球頭部の設計変更や弁座の共通化、さらに、排気弁制御回路を気球搭載機器と整合させる等の課題が残されており、今後検討を行う予定である。

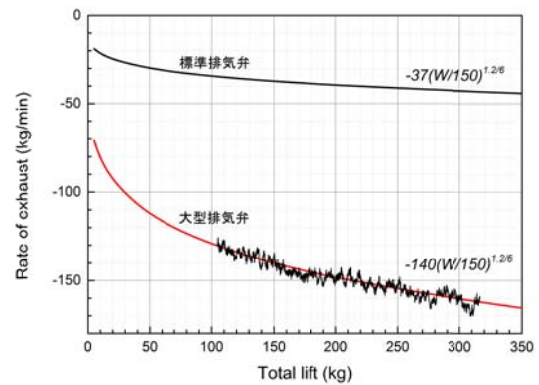


図8 大型排気弁の排気量測定結果

参考文献

- [1] 松坂幸彦, 狛豊: 排気弁, 大気球シンポジウム(昭和 52 年), 93-101, 1977.
- [2] 池田忠作, 他: 大型排気弁の開発, 平成 28 年度大気球シンポジウム, isas16-abs-034, 2016.
- [3] 西村純, 他: ブーメラン気球 II, 東京大学宇宙航空研究所報告, 10, 125-146, 1974.

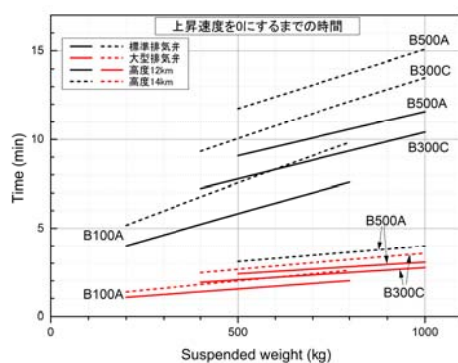


図9 偏西風高度での排気時間

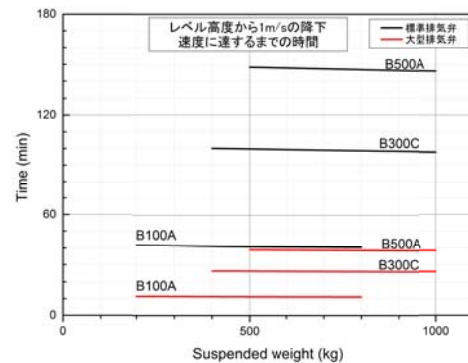


図10 レベル高度での排気時間