

モンゴルにおける成層圏気球実験環境の報告 (2019)

秋山 演亮^{*1}, 前田 恵介^{*1}, 奥平 修^{*1}

The report of the stratospheric balloons experimental environment of Mongolia (2019).

Hiroaki AKIYAMA^{*1}, Keisuke MAEDA^{*1}, Osamu OKUDAIRARNAME^{*1}

ABSTRACT

Since 2016, Chiba Institute of Technology has been conducting stratospheric balloon project in Mongolia, in cooperation with Mongolia National College of Technology and Mongolia Technical College. In Mongolia, radiosonde, classified as a small balloon, is released regularly, but there have been few medium-sized balloon experiments before. We have coordinated with the Aviation Authority of Mongolia and other relevant organizations. We have conducted more than 30 experiments, including commercial use by cooperating companies from 2016. In fiscal 2019, we also succeeded in a series of experiments from the Svbaatar Square, front of the parliament building, in the center of Ulaanbaatar. And also, we succeeded to get the securing airspace area in which the balloon experiment could always be carried out in the suburb of Ulaanbaatar. The first large balloon experiment will be carried out at the end of this fiscal year. In this paper, the history and present state of the experimental environment are reported.

Keywords: stratospheric balloon, Mongol, experimental environment

概要

千葉工大ではモンゴル工業技術大 / モンゴル高専と協力し、2016年よりモンゴルでの成層圏気球実験を実施してきた。モンゴルでは小型気球に分類されるラジオゾンデの放球は定期的に行われているが、中型気球実験はそれまでほとんど行われていなかった。我々はモンゴル航空局をはじめとする関係機関との調整を行い、協力企業の商業利用を併せて 29 回に及ぶ放球実験をこれまで実施し、2019 年度にはウランバートル市中心、国会議事堂前のスフバートル広場からの連続放球実験にも成功した。またウランバートル郊外において常時気球用実験が実施できる空域を確保することに成功した。今年度末には問ぼる初の大型気球実験も実施する予定である。本稿ではこれらの経緯と実験環境の現状に関する報告を行う。

1. はじめに

従来、大学等による気球実験は国内で実施されていたが、ドローンの普及と法規制の強化により、実施承諾を得ることが段々と困難になりつつある。そこで筆者らは海外での気球実験適地を求め、モンゴルにて2016年より中型気球の実験を行ってきた。モンゴルは東西に長い国土を持ち、また人口密度も低い。政治的にも内政・外交とも安定しており教育研究活動への理解も深い。加えて日本の高専機構が進出するなど、人的交流も盛んである。

このような観点から我々はモンゴルが世界で最も成層圏気球実験に適した場所であると考え、モンゴル工業技術大学 / モンゴル高専と協力し、2016年から気球実験を行い、実験環境の整備、および成層圏気球に必要な要素技術の開発を行ってきた。

2. これまでの実験経緯

2.1. 2016年以降の実験回数と概要

千葉工業大学およびモンゴル工業技術大学 / モンゴル高専が実施してきた実験を表1にまとめる。また協力関係にある民間企業も、商業目的での放球を11回程度実施している。

当初は気球・パラシュート・ペイロード・係留紐・通信機等、全て千葉工大にて準備し運用を行ってきたが、現在では気球と紐・通信機を除き、ほぼモンゴル側のメンバーが準備 / 運用を行えるまで技術移転に成功している。気球は日本の気球製作所製を使用している。紐に関してはモンゴル製品でも代用が可能であるが、強度を持たせて軽量化を進めるために、海外からの輸入品を利用している。

2016年の実験開始当初は予定高度と実際の到達高度が一致しないことが多かった。その後、高地（ウランバートルでの標高は約1200mもあることから気圧が低く、また冬場等には外気温も低い。ヘリウムの充填量はヘリウムボンベに取り付けたレギュレータからのみ推定しているため、これら外気温・大気圧を加味しないと正確に充填ヘリウム量を推定することが出来ないことがわかった。そこで2017年からはヘリウムガス量計算シートを作成し、実験時に外気温・大気圧を入力することで、ヘリウム装填量をより正確に推定することが出来るようになった（図1）。

2.2. 放球点の変遷

2016年6月の実験開始当初はモンゴル航空局にも知見が無かったため、安全のために航路を大きく避け、ウランバートルから南西約400kmに位置するウブルハンガイ洲の州都アルバンヘーイレンの東側から放球を行った（図2の①付近）。このときはモンゴル航空局が同地域上空に飛行禁止空域を設置したため、隣国から問い合わせがあるなど過剰反応となり、次回からはこのような対応は取られなくなった。2017年からはウランバートルの東方60kmにある避暑地テレルジ（図2の②付近）からの放球を行うようになった。このときの主な落下地点は、図2の黄緑線内となった。当初は前述のように気球へのヘリウム充填量の見積が正確では無く、また風を遮れない野外での実験であったため正確な浮力も計測できなかったため、上昇速度が想定よりも遅い場合もあり、予定よりも東に流されることも多かった。そこで前述のように装填ヘリウム量の管理を厳重に行い、また後述するように気球へのヘリウム装填を室内で行える環

表1 モンゴルにおける千葉工大 / モンゴル工業技術大・モンゴル高専による実験一覧

	実施	搭載重量	到達高度	ミッション等
1	2016.6	5,200g	40km	ダスト回収、動画撮影
2	2016.9	4,800g	21.4km	ダスト回収、動画撮影
3	"	4,000g	33.1km	動画撮影(TV企画協力)
4	2017.6	2,300g	36.2km	双方向通信
5	"	2,300g	35.7km	双方向通信
6	"		不明	モンゴル科学技術大学実験
7	2017.9	1,000g	33.4km	気球切り離し制御
8	"	4,800g	15.4km	気球内圧測定、ダスト回収
9	"	4,800g	31.5km	気球内圧測定、ダスト回収
10	2017.12	5,100g	31km	気球内圧測定、ダスト回収
11	"	5,100g	31km	気球内圧測定、ダスト回収
12	"	4,700g	32.5km	気球内圧測定、ダスト回収
13	2018.03	2,945g	16.79km	動画撮影（商業利用協力）
14	"	2,945g	31.44km	動画撮影（商業利用協力）
15	"	2,945g	20.07km	動画撮影（商業利用協力）
16	"	2,245g	26km	動画撮影（商業利用協力）
17	2018.07	約2,000g	約33km	動画撮影（商業利用協力）
18	2019.10	2,000g	31.9km	双方向通信 / 動画撮影
19	"	2,000g	31.3km	双方向通信 / 動画撮影
20	"	2,000g	33.5km	双方向通信 / 動画撮影

その他、9回の民間企業による中型放球あり

PERC成層圏気球用ヘリウムガス量計算シート		
設定値		備考
ガスボンベ容積	40.2 g	ガスボンベの刻印を確認 通常は大気圧と同じで良い、気球内圧を測定している場合はその値
気球内圧力	869 hPa	当日の大気圧をできるだけ正確に
大気圧	869 hPa	ゴム気球の設計書を確認すること
気球の中に入れたいガス量	5000 g	気球に入れたいガス量を設計したときの温度
気球の設計時の温度	0 °C	少なくとも0.2MPa以上は残して返却すること。2MPa以下はかなりの時間がかかる
外気温	23 °C	
高压ガスボンベ内に残す圧力	0.2 MPa	
計算値		備考
入れなければならないガス量	5421 g	その日の気温及び気球内圧力を考慮したガス量
必要となるボンベ本数	0.8 本	
端数ボンベ内の残圧	2.7 MPa	ボンベ1次圧力を確認するときは一端ガスを止めてから確認すること

図1 ヘリウムガス計算シート



図2 放球点の変遷と着地範囲、常時可能空域

境を構築することで正確な浮力を測定することにより、上昇速度をコントロールして風によって流される距離を短縮することが出来るようになった。

2.3. 気球専用ゲル

気球上昇速度を正確に決定するためには実際の浮力計測が必要不可欠である。一方、日々変化する風向風速に対応して適切な落下範囲に気球を落とすためには、放球点の位置を固定することは難しい。そこで我々はモンゴルの特性を活かし、遊牧民が利用するゲルを改良し、移動式気球放球施設を製作した(図3)。

通常、ゲルの上部は1m程度の小さな円形をしており、円形の側壁に括り付けられた天井を支える杭上の無数の棒をこの天井の小さな円形部分に差し込むことで天井を支える構造体を形成している。そこで天井の円形部分を5m径とおおきくし、また気球の高さを考慮して上方向にも1m伸ばして、内部で気球を膨らませて浮力計測を行う事を可能とした。

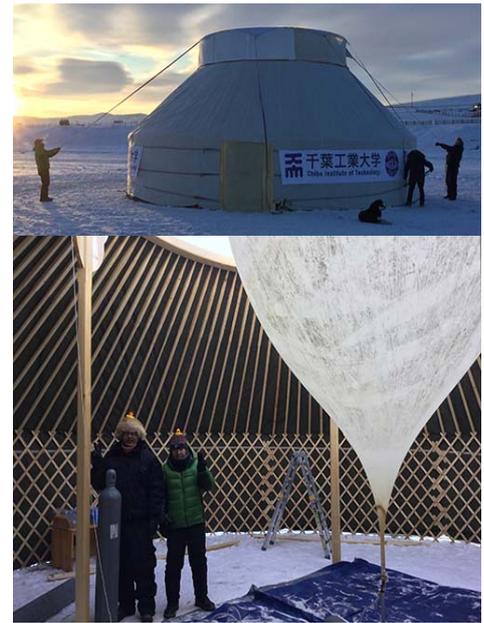


図3 気球用 移動式ゲル

3. 今年度の放球実験

3.1. 10月期の放球実験

2016年から始めた成層圏気球実験はモンゴル国内でも多くの人の知るところとなり、ロケット等の飛翔実験を行っていないモンゴルにおける宇宙教育のツールとして理解されるようになった。このような経緯からウランバートル市誕生380周年を記念して、2019年10月29日に、ウランバートル市中心に位置する国会議事堂前のスフバートル広場(図4)より、3機の気球を連続放球する計画がウランバートル市およびモンゴル高専で計画され、千葉工大が技術的な支援を行った。また千葉工大では次の大型気球実験に備え、双方向通信が可能な長距離通信装置の開発も行っていたため、これらの実験も併せて行った。



図4 スフバートル広場での放球の様子とウランバートルでのテレメ用アンテナ設置箇所

搭載するペイロードはモンゴル全土の中学生を対象として集められ、83個の応募があり、うち3個が選ばれて搭載された。これら中学生のペイロードに通信装置やパラシュートなど、気球を除く全重量が全機2,000gになるように重量調整を行った。ペイロード形状・パラシュート形状も3機でほぼ同じとなるようにした。また放球時の総浮力をほぼ2,800gに調整し、放球時間差はあるが3機をほぼ同一の条件で放球することで、フライトシミュレーションの精度や上昇 / 下降速度の見積の精度に関して検証を行った。

通信には20mW出力のLoRaを使用した。受信局は回収用車両、およびスフバートル広場横に立つ16階建てのウランバートル市庁舎の屋上に受信アンテナを設置し、受信を行った(図5)。受信され

13:40:14	-135	B9C7637E4700	B2-7	01	37	217201	142	144943	26	30k	4m	20m	33
13:40:44	-133	81C86393C700	B2-0	01	37	234200	142	148575	26	43k	4m	0m	0
13:41:54	-136	C298212F3000	B3-0	02	37	098999	141	790558	20	06k	5m	18m	5
13:42:15	-137	99C823D2C700	B2-3	01	37	246799	142	160309	26	80k	4m	20m	50
13:42:24	-132	CA99213E3000	B3-1	02	37	102001	141	798691	20	20k	4m	27m	24
13:42:45	-140	A1CC23E1C700	B2-4	01	37	249802	142	165680	26	93k	4m	21m	32
13:43:04	-140	509A65104000	B1-2	00	37	297600	142	340546	20	36k	-43m	18m	26
13:43:15	-135	A9823F04700	B2-5	01	37	240002	142	171631	27	03k	3m	41m	61
13:43:24	-131	DA98215B3E00	B3-3	02	37	107800	141	814484	20	46k	4m	27m	24
13:44:15	-140	B9CE4E40E4800	B2-7	01	37	245998	142	182785	27	29k	4m	22m	31
13:44:24	-131	EA9D21713E00	B3-5	02	37	112202	141	830292	20	72k	4m	26m	18
13:44:54	-133	F29D3F010A00	B3-6	02	38	625801	139	900055	20	72k	0m	0m	0
13:45:15	-137	89D124294800	B2-1	01	37	251400	142	192657	27	59k	5m	19m	31
13:45:23	-135	FABEA1883F00	B3-7	02	37	116798	141	846970	20	92k	7m	0m	0
13:45:43	-134	91D264344800	B2-2	01	37	253601	142	198013	27	75k	6m	21m	24
13:45:53	-131	C29F618BBF00	B3-0	02	37	130199	141	855957	21	02k	3m	0m	0
13:46:04	-140	406FE5144D00	B1-0	00	37	298401	142	372162	14	75k	-31m	18m	2
13:46:13	-136	99D36439C800	B2-3	01	37	267399	142	203812	27	89k	4m	0m	0
13:46:23	-140	CAA0218F3F00	B3-1	02	37	118198	141	864807	21	12k	3m	0m	0
13:46:53	-132	D2A0E191BF00	B3-2	02	37	131401	141	872635	21	22k	3m	0m	0
13:47:13	-133	A9D5A43D4900	B2-5	01	37	255402	142	213379	28	18k	5m	27m	54
13:47:23	-132	DAAE1944000	B3-3	02	37	119202	141	878586	21	35k	4m	49m	68
13:47:53	-139	E2A2E1974000	B3-4	02	37	119801	141	884964	21	48k	4m	20m	6
13:48:03	-131	509A65104000	B1-2	00	37	297600	142	340546	20	36k	-43m	18m	26

図6 受信テレメトリー画像

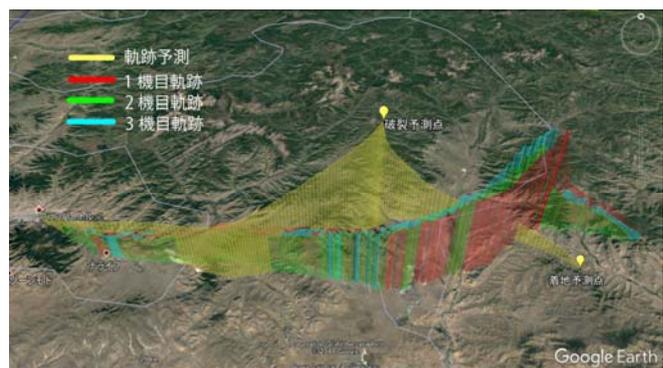


図5 フライト予測とフライト軌跡

た気球位置情報に併せて、追跡車両の位置情報もGoogle Earthに表示するプログラムも作成し、追跡を容易にしている。ウランバートル市庁舎に設置されたアンテナでも直達距離にして100km程度の受信を行う事が出来、また100km以内で追跡を行っていた回収用車両では常時受信が出来ていた。一方で高度3～5km程度よりも気球位置が下がると受信が途絶えており、なだらかではあるが丘陵地帯での受信には中継用ドローンを使うなどの必要があることが確認された。最終的な落下位置は別に搭載したSpot衛星を使った位置送信装置（Gen-3）を使うことで確定し、無事に3機とも回収を行うことが出来た。

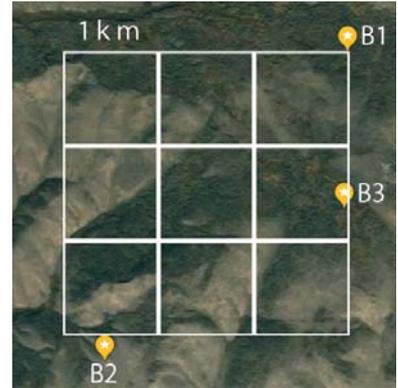


図 7 気球落下位置の相対関係

ペイロード重量・形状、および浮力をそろえて1時間半以内に放球を行った3機のフライト軌跡を図6に示す。フライト予測はケンブリッジ大が公開するCambridge University Spaceflight Landing Predictorを利用し、上昇・加工速度とも5m/sとして航路推定を行った。

今回3機とも約3.3m/sで上昇し、落下速度は10m/s程度とほぼ同様の傾向を示した。このことから上昇速度および落下速度の算出には、まだ改良の余地があることがわかった。一方で3機の最高高度は31～33kmと2ki範囲に収まっており、また落下位置はほぼ3km四方に納まった（図7）。このことから製造レベルに置いて気球の製品ムラはほとんど無く、個体差がほぼ無かったことがわかった。なお今回利用した気球は、気球製作所のコスモプレーン1200である。今後はこれらのデータを基に、上昇および落下速度の算出方法に修正を行う予定である。

3.2. 2月予定の放球実験

千葉工業大学では気球実験環境の整備を進め、最終的には流星群発生直後の成層圏における宇宙塵の採取を行う事を目的としている。回収装置を試作しこれまでも何度か放球を行っているが、採取の効率化を進め地上に落下時にコンタミネーションを防ぐ機構を取り付けた場合、中型気球としてのペイロード重量制限では実現が困難であることがわかった。そこでモンゴル航空局とも相談を行い、モンゴルでは初めてとなる大気球の運用を今年度中（2月予定）に実施する予定である。気球本体はインドより購入した0プレッシャー気球を予定している。

またそれに先立ち、飛行空域を確保するためにモンゴル航空局と交渉を行い、図2の黄色太線で囲まれた空域（北緯47° 43' 31.44"・東経108° 0' 20.52"、北緯47° 41' 9.96"・東経109° 36' 59.76"、北緯46° 51' 14.40"・東経110° 51' 41.40"、北緯47° 7' 42.60"・東経109° 2' 3.48"で囲まれた4辺の長さが120km・130km・140km・100kmの四角形の範囲内）を常時ノータム提出可能空域として使用許可を得ることが出来た。今後、機器の調整を行い今年度中の実験に挑戦する予定である。

4. おわりに

2016年から開始したモンゴルでの千葉工大の気球実験は20回を数え、現地での協力体制および運用面での許認可実績を構築・蓄積してきた。特にウランバートル市の中心からの放球実績に加え、郊外に広大な気球用の常時ノータム提出可能空域を確保出来たことは大きな成果である。これまでは中型気球までの実験を行ってきたが、今後は大型気球の実験も実施予定である。

謝辞

モンゴルでの実験に際しては、モンゴル工業大学、およびモンゴル高専のSergelen学長、Gan-od氏、Tugu氏の多大なる協力を得て実現することが出来た。またモンゴルの宇宙組織であるMARSAの全面的な支援とウランバートル市の理解により、スフバートル広場からの放球実験を行うことが出来た。加えてモンゴル航空局をはじめ、関係機関の御理解と御支援を賜ることが出来た。関係機関・関係者の皆様に、心より御礼を申し上げます。