

超薄型高高度気球による世界最高気球高度記録の達成 (BU 60-1)

齋藤 芳隆¹・山上 隆正¹・松坂 幸彦¹・並木 道義¹
島海道彦¹・横田 力男¹・広沢 春任¹・松島 清穂²

Development of The Highest Altitude Balloon Using The Ultra Thin Polyethylen Film (BU 60-1)

By

Yoshitaka SAITO¹, Takamasa YAMAGAMI¹, Yukihiro MATSUZAKA¹, Michiyoshi NAMIKI¹,
Michihiko TORIUMI¹, Rikio YOKOTA¹, Haruto HIROSAWA¹ and Kiyoho MATSUSHIMA²

Abstract: The balloon group of the Institute of Space and Astronautical Science (ISAS) has been engaged in the development of such high altitude balloons with a thin film as to lift a light payload with a weight of about 10kg since 1991. From 1999, we made several balloons using the 3.4 μm film and repeated test flights with enlarging their volumes step by step. In this year, 2002, we made a balloon with 60,000m³ in volume and performed a test flight. The balloon reached the altitude of 53.0km, and it revised the world record of the highest balloon altitude established 30 years ago.

概 要

宇宙科学研究所気球部門では、1991年以來、10kg程度の観測器をより高高度に到達させる気球を開発してきた。1999年からは、厚み3.4 μm の気球用ポリエチレンフィルムを用いた気球を製作し飛翔実験を重ね、順次気球の大型化を進めてきた。本年、2002年5月23日に体積60,000 m³の気球を製作し、飛翔実験を行った。気球は正常に上昇し、高度53.0 kmという気球到達最高高度の世界記録を実に30年ぶりに塗り変えることに成功した。

重要語: 科学観測用気球, 高高度気球, 超薄型ポリエチレンフィルム

¹宇宙科学研究所株式会社

²藤倉航装株式会社

1. はじめに

より高い高度を飛翔する気球の開発は気球工学初まって以来の大きなテーマである。日本においても、宇宙科学研究所の前身である宇宙航空研究所に気球工学部門が設置されて以来、今日に至るまで高高度への挑戦が行なわれてきた。当初、気球を大型化する方向での開発が進められ、1973年には体積 $200,000\text{ m}^3$ の気球の製作、飛翔に成功している [1]。一方、アメリカにおいては、1972年に体積 $1,350,000\text{ m}^3$ の気球の飛翔に成功しており、高度 51.8 km に到達しており、これが現在までの気球最高到達高度となっている。

我々、宇宙科学研究所気球グループは、1991年から軽い気球を製作することで、より高高度を飛翔させる努力を始めた。気球の飛翔高度は気球本体を含めた全重量を軽くすることによって飛躍的に向上する。低高度のロケット実験よりも安価に、長時間飛翔させることを一つの目標とし、 10 kg 程度の重量の観測器を飛翔させることを念頭においた。このため、気球フィルム接着装置の開発、搭載機器の軽量化、放球装置や方法の開発を順次行ってきた。この集大成として1997年には、体積 $120,000\text{ m}^3$ の気球を製作し、高度 50.2 km に到達させることに成功している [2]。ここでは、ウインゼン社製の $5.8\text{ }\mu\text{m}$ 厚のフィルムを使用した。

その後、気球フィルム自体の開発を手掛け、宇部興産、柴田屋加工紙の協力により、1998年には、厚さ $3.4\text{ }\mu\text{m}$ のポリエチレンフィルムの製作に成功した。これは、メタロセンを触媒として製作したレジンをを用いたことが大きい。1999年には、このフィルムを用いて体積 $1,000\text{ m}^3$ の気球を製作し、飛翔実験に成功した [3]。その後、順次気球を大型化すると共に、排気口付きの気球の開発を行ってきた。2001年には体積 $30,000\text{ m}^3$ の気球を飛翔させ、高度 50.7 km に到達させることに成功するに至った [4]。これまでの経緯を今回の成果を含め表1にまとめた。

2. $60,000\text{ m}^3$ 気球と搭載機器

本年、体積 $60,000\text{ m}^3$ の気球を製作し、世界最高高度へと挑戦した。表2に気球の諸元を示す。気球頭部のガス注入口の処理は、従来の超薄型高高度気球と同様で、頭部で束ねたフィルムを $20\text{ }\mu\text{m}$ につなぎ、その上で高強度塩化ビニル製パイプに巻き付け、ホースバンドで締めている [3]。

搭載用ゴンドラの写真を図1に示す。気球が膨張してゆく様子をとらえられるように、ITVカメラを二台搭載した。それぞれの仕様は表3のとおりである。ただし、画像転送用には三協特殊無線㈱の 1687 MHz 画像送信機を一台だけ搭載し、コマンドでカメラを切替えられるようにしている。また、高度計測のため、ソニー製のWGS-84測地系のGPS受信機IPS-5000を搭載した。

テレメーターには、 9600 baud のGPS受信器の信号をボーレート変換して 600 baud に変換してFSK変調をかけて5秒に一回転送するテレメーターを使用した。これを三協特殊無線㈱の 1672 MHz 送信機にて送信した。また、コマンドには簡易PCMコマンドを用いた。コマンド項目は表4に示した。

この他、軽量気球用バラスト投下装置 (460 g/分) も搭載していたが、実験時にはバラストを搭載せずに放球した。

3. 気球の放球方法の検討

図2に気球の飛翔構成を示す。満膨張時でもカメラの視野に気球全体がとられられるようにするため、吊り紐が長くなっている。このため、気球頭部からゴンドラまでの長さは 120 m 以上におよぶこととなった。また、総浮力は 40 kg 以上あり、人の手で気球を保持しておくのは困難である。

薄型高々度気球の放球は、以下の方法で行ってきた。

- $5,000\text{ m}^3$ 程度までの小さい気球の場合、気球頭部を人の手で保持しておき、そのまま離して、ゴンドラを持った人がちょうどいい位置になるように走る、というダイナミック放球法が行なわれている。ここで、気球

表1 高高度気球開発の経緯

年度	出来事
1991	気球フィルム接着用ベルトシーラーを開発。基本搭載機器の軽量化。狭い工場内で連続的に効率よく接着できるようになり、品質管理の点も向上。また、テレメーター、コマンドの省電力化による小型化も行なった。
1992	体積15,000 m ³ の気球で高度46.0 kmに到達。大型気球の国産化に成功。
1993	大型気球放球装置の開発。気球を押える部分にエアバッグを用いて傷つけずに100 kgの浮力を押え込む。
1994	体積30,000 m ³ の気球で高度47.8 kmに到達。24年ぶりの日本記録更新。
1995	排気口つきの長時間観測用気球を開発。飛翔試験に成功。気球が上空で破裂しないために、気球底に穴をあけた気球。数種類の方法を計算と実験で検討の結果、真下に柔軟ベルト型で取り付けるのが最良と結論。
1996	軽量パラスト投下装置の開発。放球装置をより大型気球用に改良。
1997	体積120,000 m ³ の気球で高度50.2 kmに到達。基礎技術の確立。
1998	従来半分の厚みの3.4 μm厚フィルムを開発。アメリカ産から国産に移行。メタロセン触媒を用いたポリエチレンが薄型フィルムの制作に向くことに着目し、このレジンをを用いることによる成功。
1999	体積1,000 m ³ 気球による実証試験に成功。
2000	体積5,000 m ³ の気球で高度43 kmに到達。排気口つき気球の開発。大型気球放球用に飛揚場の拡張も行ない、体積1,000,000 m ³ の気球の飛翔も可能となった。
2001	体積30,000 m ³ の気球で高度50.7 kmに到達。排気口つき気球の飛翔に成功。
2002	体積60,000 m ³ の気球で高度53.0 kmに到達。世界最高気球高度達成。

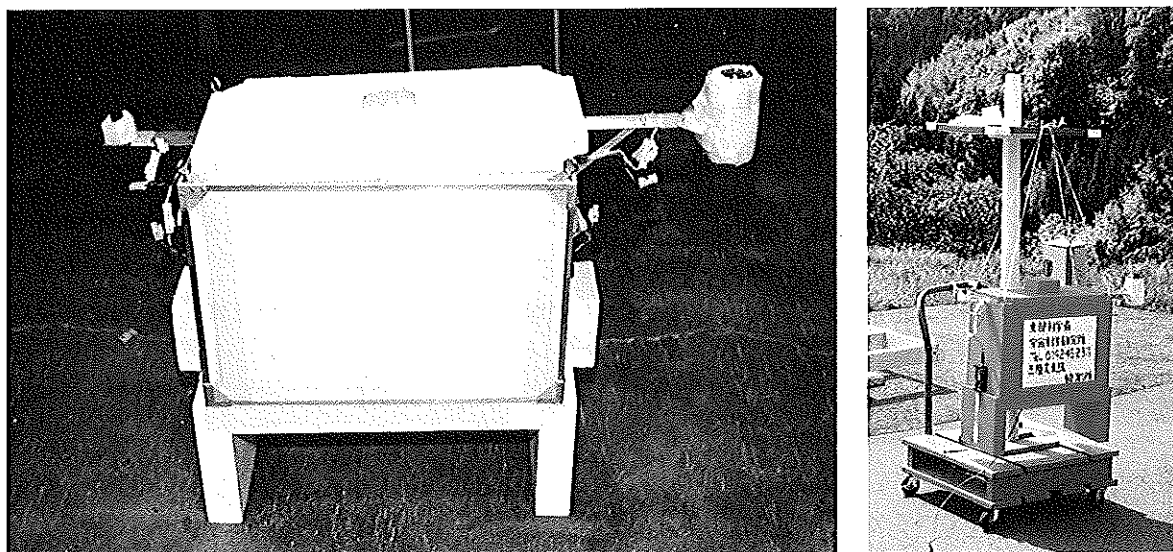


図1 BU 60-1 気球用ゴンドラ。右にソニー製小型カメラ，左にパナソニック製超小型カメラ，中央にGPS受信器を搭載した

表2 BU 60-1 気球諸元

名称	BU60-1
製造年月	平成14年5月
気球メーカー	藤倉航装株式会社
フィルム名称	ユメリット極薄フィルム
フィルム厚み	3.4 μm
フィルムメーカー	柴田屋加工紙株式会社
パネル数	116
直径	53.74 m
全長	74.45 m
ガス注入口	40 m \times 1本
重量	34.37 kg
ロンチャー線	17 m
引き裂き	あり
吊り手	セルブ

は、10人程度の人の手の上で伸長している。

- 小さい気球の場合は、気球の下部をバックで包んでしまい、放球後に伸展させる、パッキング放球も行なわれている。
- 2001年の体積30,000 m³の気球の場合、気球頭部はエアバックを用いた大型薄型気球放球装置を用いて保持した。気球は地面に折りたたんでおき、ゴンドラはゴム気球を用いて吊り上げ、ゴンドラから伸ばしたロープを人の手で保持して飛ばないようにした。その後、気球を立ち上げることなくそのまま離し、最後にゴンドラを引っ張っていた紐を離した。
- 1997年に行なった体積120,000 m³の気球の場合、不完全立て上げ法を用いた。これは、気球を半分程度まで立て上げたところで保持し、残りの部分を折り畳むか伸展するかしておき、その状態で気球を離す方法である。この気球の場合は、折り畳んでいた。なお、ゴンドラはポリエチレン製の補助気球で吊り上げ、それから伸ばしたロープを人の手で飛ばないように保持した。

今回は、大型放球装置が完成したため、これを用いてセミダイナミック放球法を用いた。これにより気球頭部までが長く浮力が小さいことによって大きくなる風の影響を最小限に抑えることが可能となる。この放球手順は以下のように行う。図3に概略を示した。

- まず、ゴンドラを大型放球装置にセットし、放球装置のつめの部分に吊り紐にとりつけたリングをかませる。
- 気球頭部は電動台車に固定した大型薄型気球放球装置にて保持つつ、ガスづめを行う。
- ゴンドラをゴム気球で吊り上げ、垂らしたロープを人が保持し、ゴンドラが大型放球装置と衝突しないようにする。
- 大型薄型気球放球装置を解放し、気球を放球する。ただし、大型放球装置によって保持されたままであるため、気球は大型放球装置の上に立て上がる。
- 大型放球装置から観測器を放球する。
- 観測器を吊り下げているゴム気球をコマンドで切り離す。

4. 気球実験

2002年5月23日、三陸大気球観測所にて飛翔試験を行った。当日の天候はくもり、風速は非常におだやかで

表3 BU 60-1 搭載ITVカメラの仕様

製作メーカー	ソニー	パナソニック
商品名	EV1-310	GP-CX161/53
信号方式	NTSC	NTSC
水平解像度	460 本以上	330 本以上
垂直解像度	350 本以上	350 本以上
レンズ	F1.4、f=5.9~47.2 mm	F2.0、f=3.8 mm
垂直画角	44.3° ~ 5.8°	40.0°
水平画角	34.9° ~ 4.4°	53.4°
電源	DC6~9 V、2.8 W	DC 4.8~5.5 V、160 mA
動作温度	0 ~ 50 °C	-10 ~ 50 °C
外形寸法	49×51×100 mm	26×22×13.3 mm
重量	210 g	8 g

表4 BU 60-1 のコマンド項目

1	気球切り離しカッター
2	バラスト投下開始
3	バラスト投下停止
4	超小型カメラ (パナソニック) 選択
5	小型カメラ (ソニー) 選択
6	ワイド選択
7	ズーム 選択
8	ズーム or ワイド実行
9	ズーム or ワイド停止
10	ゴム気球切り離し
11	未使用

あった。打ち上げの様子を図4に示す。6時35分に放球された気球は上昇速度260 m/secで正常に上昇し、10時7分に最高高度53.0 kmに到達した (図5)。この気球は、最高高度に到達した後に割れることなく水平浮遊に入った。気球が陸地に近付いたため (図6)、10時18分に気球切り離しコマンドを送信し、気球を破壊した。ゴンドラはパラシュートによって海上に緩やかに降下した。

図7に満膨張状態の気球をパナソニックの小型カメラにて撮影した映像を示す。すべてのパネルに均等に力がかかっており、きれいに製作されていたことが裏付けられた。

5. 議 論

この気球の搭載重量と体積から、満膨張時の浮力と重量が釣り合う高度を求めると、気圧が0.604 hPa、高度52.8 kmの場合となる。ここでは、気球の圧力と大気圧とが等しくなるゼロプレッシャー気球の場合を想定しており、大気温度と気球のヘリウムガスの温度が等しいと仮定している。また、大気モデルとしては、三陸町綾里の気象ロケット観測にて1992年から1994年の5月の平均値を用いた [4]。この気球で実際に到達した高度

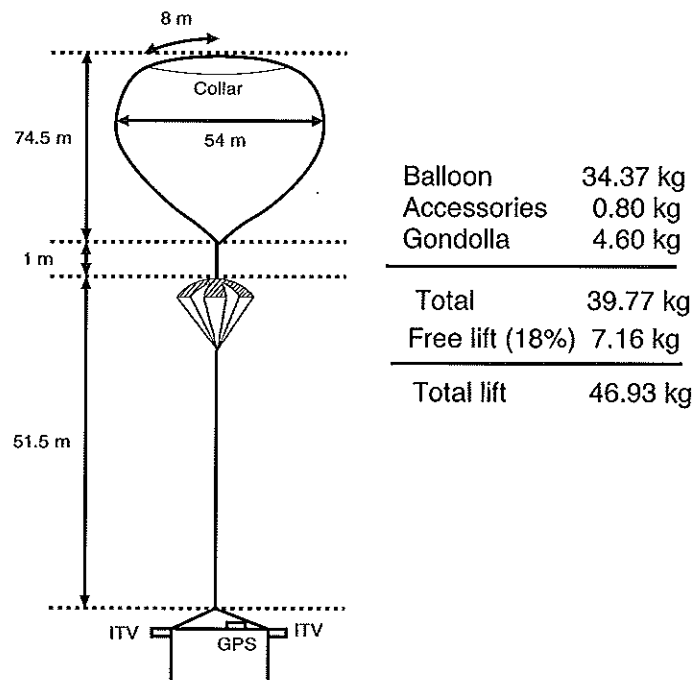


図2 BU 60-1 気球の飛翔構成

は 53.0 km (0.590 hPa) であり、大気モデルの誤差の範囲で一致する。

図8に3.4 μ mフィルムを用いて製作した気球の体積と重量の関係をしめす。図中の点線は、気球の重量を W kg、体積を V m³としたときに、

$$W = 0.023 \times V^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

を満たす線である。2/3乗の依存性は気球の重量が表面積に比例することを示す。

これを用いて体積と到達高度との関係を求めたのが図9である。ここで、搭載機器、荷姿は10 kgとし、大気モデルとして上記の三陸町綾里の気象ロケット観測データを用いた。到達可能な高度は、体積を増やしてもさほど向上しないことがわかる。これは、到達可能気圧が気球の体積と反比例の関係になっており、高度が気圧の対数に比例することに起因する。したがって、気球の体積を指数関数的に増加させないと目立った高度の更新はできない。現在の気球の体積は60,000 m³に達しており、今後、さらに高い高度を飛翔させるためには、もう一度、気球自体の重量の削減に取り組む必要があることがわかる。

6. 終わりに

我々は、超薄型気球の大型化をすすめ、体積60,000 m³の気球の飛翔に成功した。この気球は高度53.0 kmに到達し、実に30年ぶりに世界最高気球到達高度記録を塗りかえることとなった。

今後、より高い高度を飛翔する気球の開発は、気球の大型化という方向でなく、もう一度フィルムの開発に戻ることを計画している。より薄いフィルム、より幅の広いフィルムを製作し、再度、高高度を目指して行く所存である。

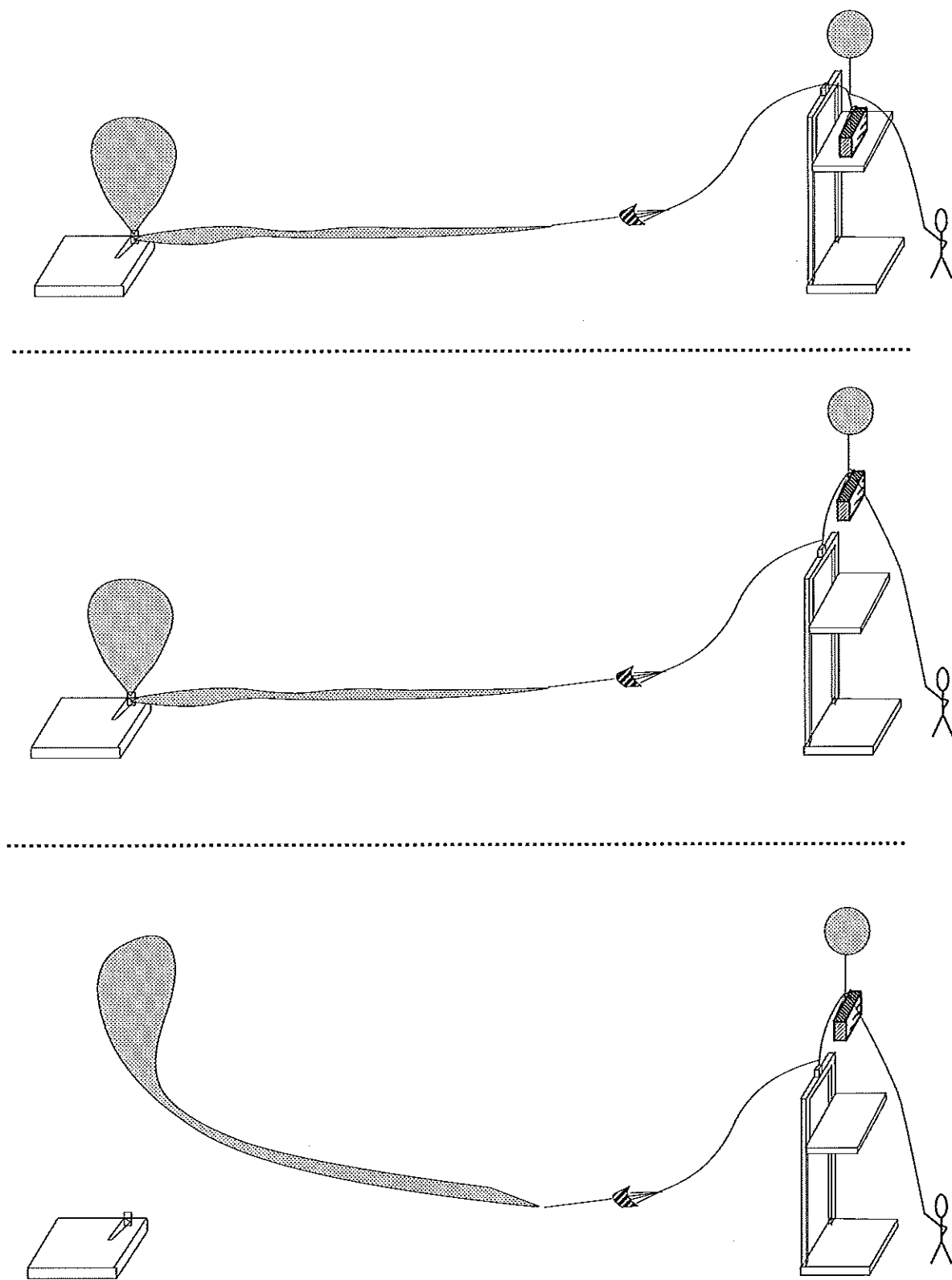


図3 薄型高高度気球のセミダイナミック放球法による放球手順

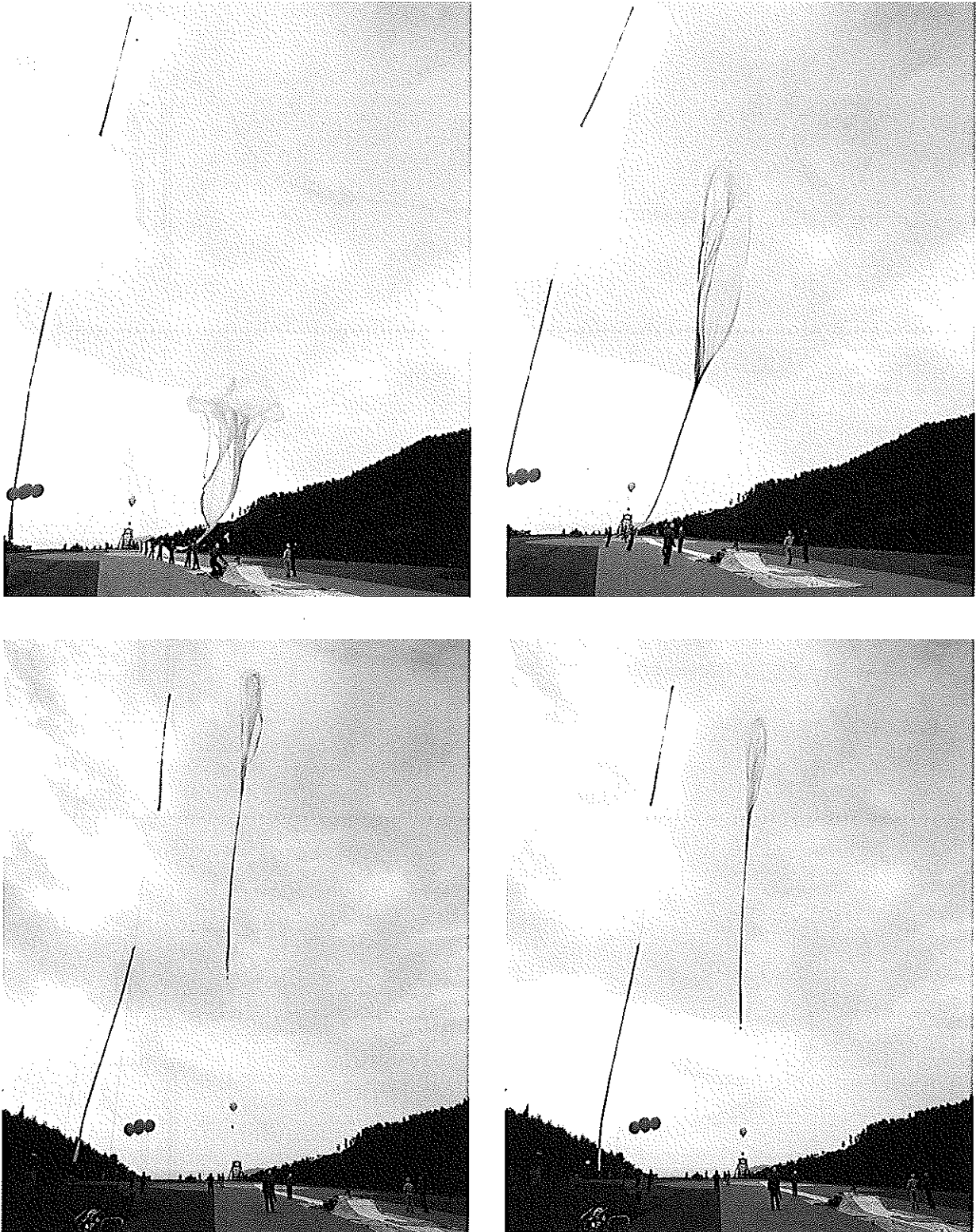


図4 BU 60 - 1 気球の打ち上げの様子

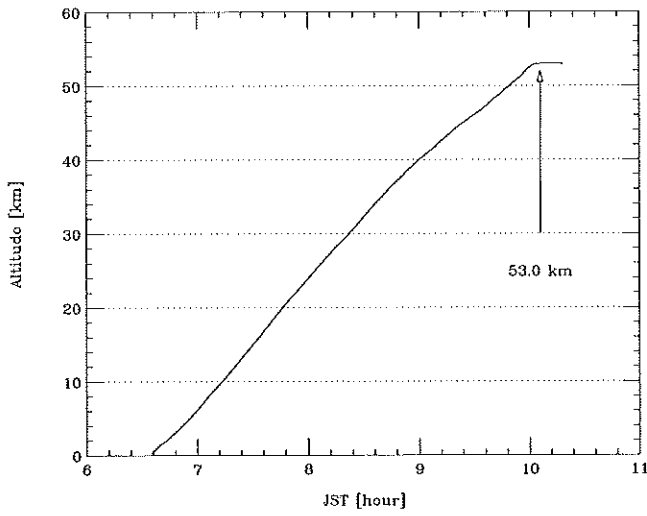


図5 BU 60-1 気球の高度曲線

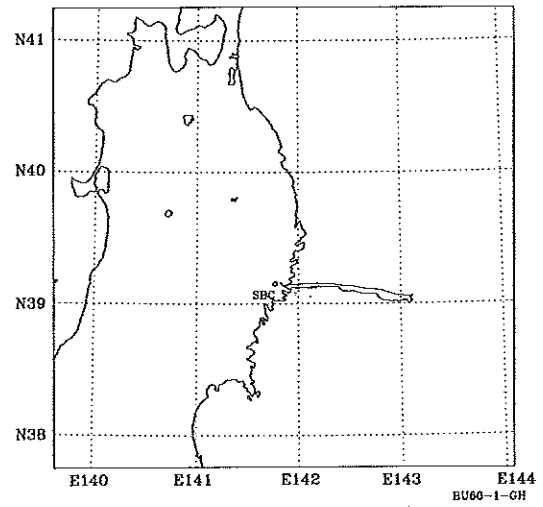


図6 BU 60-1 気球の飛翔航跡図

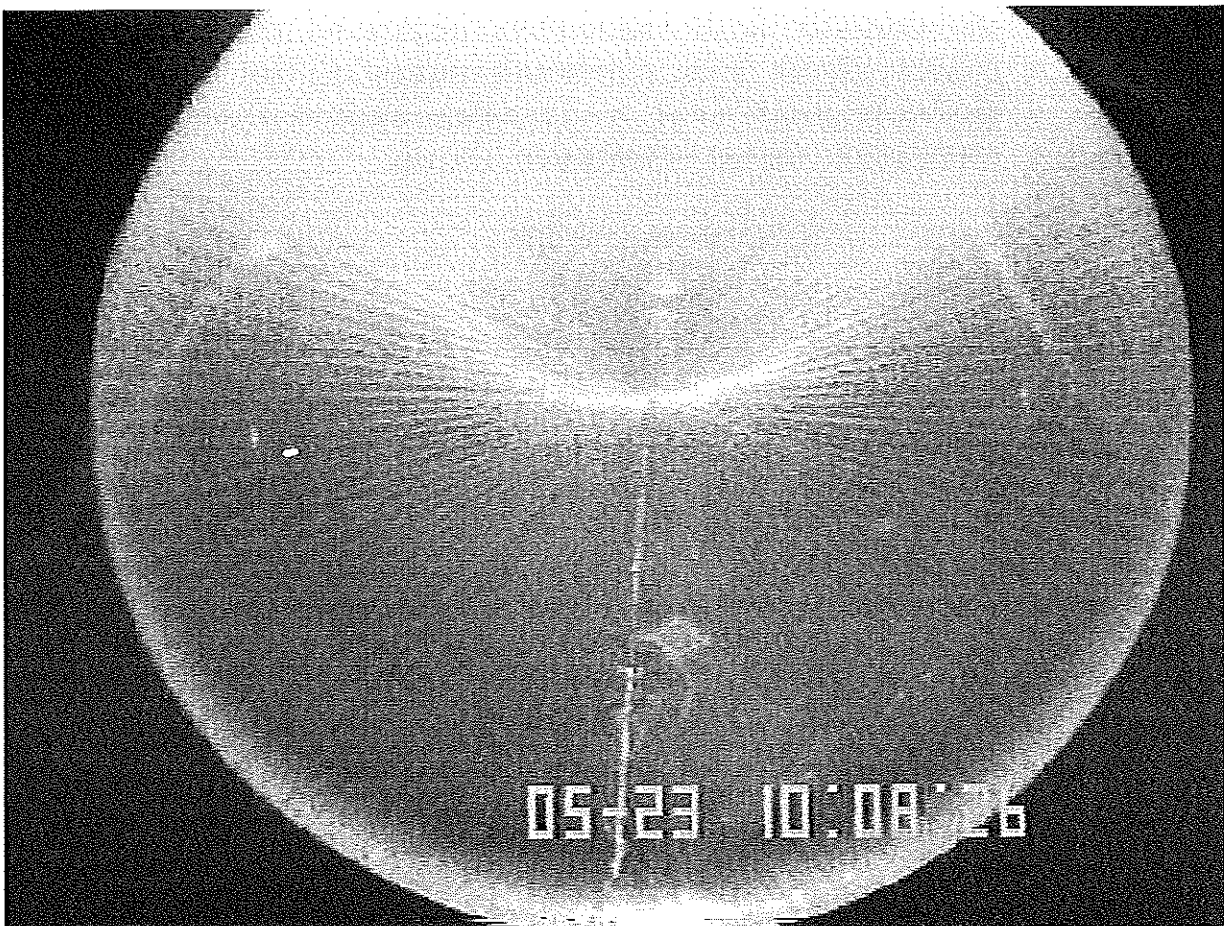


図7 満膨張時のBU 60-1 気球

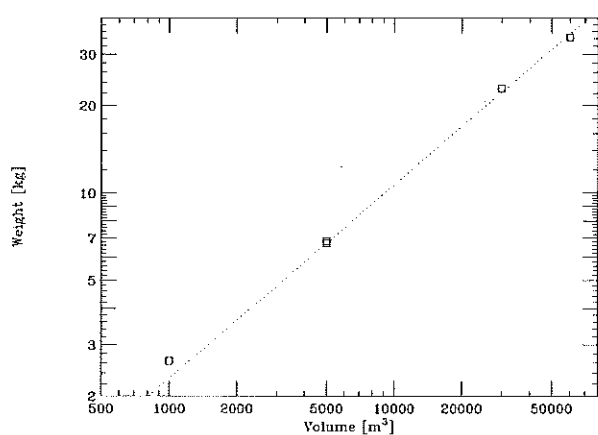


図8 3.4 μm フィルムを用いた気球の体積と重量の関係

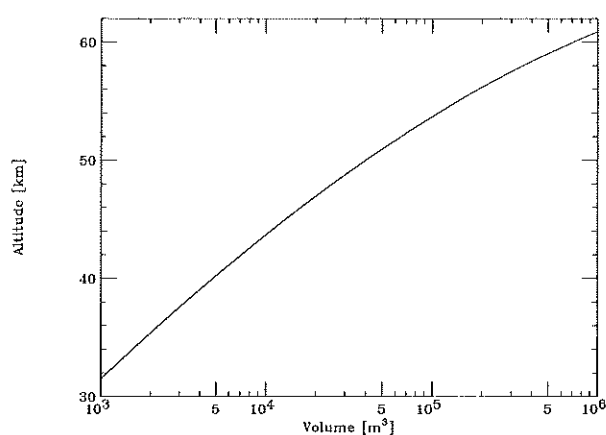


図9 3.4 μm フィルムを用いた気球の体積と最高到達高度の関係。搭載機器、荷姿は10 kgを想定している

参考文献

- [1] 西村 純, 他: B200-1号機飛翔性能, 東京大学宇宙航空研究所報告, 第10巻, 第1号, P. 89, 1974.
- [2] 松坂幸彦, 他: 大型の薄型高高度気球 (BT120-1), 宇宙科学研究所報告特集第37号, P. 1, 1998.
- [3] 斎藤芳隆, 他: 超薄型高高度気球の開発 (BT1-3), 宇宙科学研究所報告特集第40号, P. 1, 2000.
- [4] 斎藤芳隆, 他: 超薄膜型高高度気球の開発 (BT30-1), 宇宙科学研究所報告特集第44号, P. 17, 2002.
- [5] 山上隆正, 他: 高高度観測用気球, 宇宙科学研究所報告特集第33号, P. 3, 1996.