

B500型気球の放球と飛翔

井筒直樹¹・並木道義¹・鳥海道彦¹・松坂幸彦¹
川崎朋実¹・飯嶋一征¹・平山昇司¹・瀬尾基治¹
齋藤芳隆¹・山上隆正¹・松嶋清穂²

Launching and Flight of B500 Balloon

By

Naoki IZUTSU¹, Michiyoshi NAMIKI¹, Michihiko TORIUMI¹, Yukihiro MATSUZAKA¹,
Tomomi KAWASAKI¹, Issei IJIMA¹, Shouji HIRAYAMA¹, Motoharu SEO¹,
Yoshitaka SAITO¹, Takamasa YAMAGAMI¹ and Kiyoho MATSUSHIMA²

Abstract : Launching a large balloon at a limited launching field is a long standing subject in Japan. The volume of the largest balloon ever launched successfully was 200,000 cubic meters. This type of balloon was firstly launched in 1973. A larger balloon with a volume of 500,000 cubic meters was tried to launch in 1980; however it did not succeed because of burst during the ascending phase. For launching a large balloon with a total lift more than 1 ton, the static launching method, we have used for more than 20 years, has several weak points that may result in failure. We developed a semi-dynamic launching method using a new launcher, which is fixed on the ground and has a freedom of rotation around the vertical axis and an elevation system up to 5 m, as well as a leap-up spooler system for holding a balloon bubble, in 1999. We have launched several balloons using the method. In 2003, a balloon with a volume of 500,000 cubic meters, which was made of polyethylene films of 20 micro meters in thickness, was successfully launched with the semi-dynamic launching method. It is the largest balloon ever launched in Japan.

¹宇宙科学研究本部

²藤倉航装株式会社

概 要

三陸大気球観測所のように限られた放球場で大きな気球を上げることは長年の課題であった。これまでに打ち上げに成功した最大の気球は、1973年に初めて上げられた容積200,000立方メートルのものである。より大きな容積500,000立方メートルの気球が1980年に打ち上げられたが、上昇中に破壊して成功には至らなかった。総浮力が1トンを超えるような大きな気球を、これまで20年以上行ってきた立て上げ放球法によって上げるには、いくつかの問題点があった。そこで、日本独自のセミダイナミック放球法が考案された。このために、地面に固定されているが、自由に回転でき、5mまでペイロードを昇降させることのできる大型放球装置と自走式跳ね上げローラー車が開発された。2000年以降、この放球法によって大型気球が上げられている。そして、2003年に、厚さ20 μ mのポリエチレンフィルムで作られた容積500,000立方メートルの気球の打ち上げと飛翔に成功した。この気球は日本で放球された最大容積の気球である。

重要語：科学観測用気球，超大型気球，セミダイナミック放球法

1. はじめに

三陸大気球観測所のように限られた放球場で大きな気球を上げることは長年の課題であった。国産の気球は、1966年のB5型気球（容積5,000 m³）、1967年にB15（容積15,000 m³）、1968年にはB30（容積30,000 m³）、1969年にB50（容積50,000 m³）と大型化され、1970年にはB100型気球（容積100,000 m³）を上げるに至った。これまでに三陸大気球観測所から放球と飛翔に成功した最も大きい気球は、1973年に初めて上げられたB200型気球（容積200,000 m³）であった。この時期の気球の打ち上げ方法は、スタティック放球法[1]と呼ばれている。この方式は、ガスを充填した気球頭部の直下を3本のゴムローラーで押さえ、頭部より下の気球部分は地上に折りたたんでおいて放球する方法である。

その後、三陸大気球観測所では、1980年にこのスタティック放球法によりB500-1号機（容積500,000 m³）を放球したが、高度12 kmで降下をはじめ飛翔成功には至らなかった。原因は、上向きの力が500kg（総浮力は900 kg）を超える気球頭部を3本のゴムローラーで押さえ、さらに、気球本体のたたみかたの片寄りが加わり、部分的に10 MPaを超える力が気球フィルムにかかった結果、フィルムの一部が挫滅したためと考えられた。また、気球の頭部を押さえておくため、気球が大きくなるほど、気球頭部を押さえているランチャーから気球尾部までが長くなり、その結果、ペイロードが離陸するまでの時間が長くなるため、放球に向けての気球とペイロードの配置が難しくなる。

そこで、1982年以降、新スタティック放球法[2]（立て上げ放球法）と呼ばれる方式が使われるようになった。この方法は、図1に示すように、気球の底部をランチャーに保持し、ヘリウムガスの充填時は、気球の頭部を曲率の小さいローラーで保持する方式である。ガスがある程度入ったところで、ガスが充填された頭部の直下をカラーで締めて、そこから下の気球が広がらないようにする。ガスの注入が終わると、ローラーをランチャーに向かって前進させ気球頭部の位置をしだいに高くしていき、最終的に気球全体をランチャーの真上に立て上げる。その後、風の方向に合わせてランチャーとペイロードの乗った回転テーブル全体を回転させ、カラーを取り外した後に放球する。ペイロードとパラシュート部分に力がかかっていない状態で放球するのは初期のスタティック方式と同じであるが、ランチャーからペイロードまでの長さが非常に短くなり、放球しやすくなった。また、500 kg以上の浮力に対してもフィルムへの挫滅等の損傷はなくなった[3]。

新スタティック放球法によって、これまでに350機以上の気球の放球に成功している。しかし、この方式においても気球を立て上げていく過程ではローラーにより気球本体をしごいていくため、総浮力が大きくなるほど気球のフィルムに損傷を与える恐れが大きくなるとされてきた。また、気球が長いと立て上げに時間も要する。気球が大きくなり、総浮力も増加すると、気球のフィルム内のわずかなガスがローラーの移動とともに気球尾部に集められフィルムが裂ける可能性もある。また、気球が上昇を開始した時点では、気球尾部に荷重はかかっていない状態であり、気球がある程度上昇した時点で、パラシュート等のつり紐が伸びきり、ここではじめてパイロード荷重が気球にかかる。一方、気球は上昇を開始してからしばらくは大きな変形を繰り返しながら上昇する。したがって、パイロード荷重がかかり始めた時点の気球の形状によっては、気球のフィルムに大きな負荷が生じる恐れもある。

そこで、新しい放球方法が開発された。まず、放球場は20 m延長され、フィールドの先端部に新たにランチャーが設けられた[4]。これにより、それまでの回転テーブルからフィールド端までの有効距離90 mが最大160 mまで確保できるようになった。大型放球装置は地面に固定されているが、パイロード保持台は上下方向に5 m昇降可能であり、回転は自由にできるようになっている。また、ガス充填の間気球頭部を保持するための跳ね上げローラー車が新規に製作された[5]。新しい放球装置と跳ね上げローラー車を用いた日本独自のセミダイナミック放球法[6,7]が考案され、2002年までに放球試験が繰り返され、新しい放球方法が完成された。そこで、2003年9月に、容積500,000 m³のB500-2号機の放球を再度試み、放球に成功するとともに良好な飛翔が行われた。

2. B500-2号機の製作

1991年より、より高い高度に軽量のパイロードを飛翔させることを目的に、薄膜型高々度気球が開発されてきた。そして、1998年に、宇部興産株式会社と柴田屋加工紙株式会社の協力により、メタロセンを触媒としたレジンをを用いて、厚さ3.4 μ mのフィルムの開発に成功し、気球用フィルムとして非常に優れた性能を持つことが確認された[8]。徐々に薄いフィルム[9]の製造を行う一方で、この同じ方法により大型気球用のフィルム(厚さ20 μ mおよび10 μ m)の製造も行い、同様に良好な性能が得られた。このフィルムを用いた大型気球も放球され、良好な飛翔性能が得られた。メタロセン触媒を用いた厚さ20 μ m、幅2820 mm(折り径1400 mm)のフィルムの強度および最大伸び率は、25°CでMD、TD方向とも、40 MPa、1000%、温度-80°Cでは、MD方向が55 MPa、420%、TD方向では54 MPa、460%である。

B500-2号機はこの国産フィルムを用いて製作された。表1にこの気球の諸元を示す。隣り合ったゴアは厚さ40 μ mの補強テープとロードテープの間に重ねて熱溶着された。ロードテープはポリエステル繊維をポリエチレンフィルムでラミネートしたものである。気球製作に先立って、溶着試験と気球頭部の1/4部分の試作が行われた。また、気球尾部フィッティングの強度試験も行われ、問題ないことを確認した。図3にB500-2号機の荷姿図を示す。表2はB500-2号機の重量構成を表すものである。総浮力が1.26トンあり、気球のトップからパイロードまでの長さが185 mあるため、セミダイナミック放球方法を用いても、放球場の全長160 mより長いいため、工夫が必要とされた。

3. 放球方法

三陸大気球観測所の飛揚場の中央に直径12 mの回転テーブルがあり、スタティック放球法ではここにランチャーをセットして放球を行ってきた。この方法では、図1のようにランチャーとパイロードが乗った回転テーブルを回転させ、風の向きに合わせる。したがって、飛揚場の端から回転テーブルまでの90 m部分に気球を展開することになり、全長112 mのB200気球までが放球の限界であった。

1998年にフィールドを海側に20 m伸張し、その先端部に大型放球装置を完成させた。フィールドがせまいため通常諸外国で行われているダイナミック放球法を適用するのは不可能である。図2に示すように、大型放球装置は従来のランチャーに相当し、地面に固定されているが、エレベーター機構および回転機構により、高い位置か

ら風向きに合わせてペイロードを離陸させることができる。この方式により、ダイナミック放球法のようにペイロードを吊り下げた車を走らせることなく、風があっても安全に放球が可能となった。ペイロードを地面から5 m上昇させた位置から放球することにより、最大6 m/sまでの風の中で問題なく安全に放球することが可能となった。

ペイロードの上部つり紐部分は大型放球装置トップのリリース機構に固定される。気球頭部がローラーで押さえられてガスを充填し、カラーが装着される場所までは従来の立て上げ放球法と同じである。新規に製作された跳ね上げローラー車は2.5トンの浮力まで使用可能である。ガス充填後、昇降台を操作してペイロードが5 mの高さまで持ち上げられる。ローラーが斜め45度上方向に跳ね上げられると、気球頭部が上昇を開始し、最終的にランチャーの上にパラシュート等も含めてすべてが立ち上がる。大型放球装置のトップにはロードセルが内蔵されており、この時点で浮力を確認することができる。ランチャーは風の方向に合わせて回転され、無線方式で動作するカラーがはずされ、ペイロード保持部のリリース機構が開放され、ゴンドラが上昇を開始する。

この方式により、1999年にB5およびB15型気球を用いて地上試験が繰り返され、1999年には実際にB15型気球の放球に成功した。その後、2001年にB30およびB50型気球、2003年にはB80およびB100型気球の放球および飛翔に成功した。これにより、日本独自のセミダイナミック放球法が完成された。この方法を用いることにより、ランチャーまでの距離が従来の90 mから160 mまで長くなったこととあわせて、原理的にはB1000型気球まで放球可能となった。また、気球およびパラシュート等ペイロードから上は伸びきった状態でペイロードがリリースされ、静止状態からスムーズに離陸するため、立て上げ放球で発生するような、荷重の急変動と気球の変形に伴って生じる気球フィルムへの負荷もほとんど生じないため非常に安全な放球方法である。

図3に示したB500-2号機の荷姿図に示すように、この気球および荷姿の全長は185 mあるため、はじめから全体をそのまま展開することが不可能である。そこで放球方法の検討が行われ、以下の手順で放球は行われた(図4参照)。

- (1) 気球の全長をフィールドの端から展張する。
- (2) ペイロードを大型放球装置の昇降台の上に置き、ゴンドラをつる4本のつり紐がひとつになった部分の少し上に取り付けられた放球リングと呼ばれる部分を大型放球装置のトップに設けられたリリース装置に接続する。
- (3) 気球の尾部を移動式ランチャー付属のウインチロープと接続する。
- (4) 気球頭部からガス注入口の少し下までを跳ね上げローラーにセット。
- (5) 気球の尾部にゴンドラと接続されている荷姿パラシュートの頭部を接続、結線を行う。
- (6) ヘリウムガスの注入を開始。
- (7) 跳ね上げローラー車をカラー位置まで移動させる。
- (8) カラーをセットする。
- (9) ガス注入終了後、ウインチロープを繰り出し気球を徐々にローラーの上に立て上げる。
- (10) 荷姿に張力がかかりウインチがフリーになったら、気球尾部からウインチロープをはずす。
- (11) 跳ね上げローラーを開放し、気球を立て上げる。
- (12) 大型放球装置全体を回転させ、ゴンドラが気球トップに対してちょうど風下側になるように調整する。
- (13) カラーを開放し、落下を確認する。
- (14) リリース機構を動作させ、放球する。

表1 B500-2号機

容積	500,000 m ³
直径 (満膨張時)	115.2 m
高さ (満膨張時)	91.0 m
全長	159.5 m
ゴア数	130
ロードテープ数	130
フィルム厚	0.000020 m
フィルム	メタロセン触媒ポリエチレン
ロードテープ	200 lbsラミネートポリエステル
重量	799 kg
ガス注入口	2 (位置: 頭部から12 m, 全長: 40 m)
排気孔	2 (位置: 底部から35 m, 全長: 22.75 m, 面積: 12.5 m ²)

表2 B500-2号機

気球重量	799.0 kg
荷姿重量	22.2 kg
観測器重量	324.0 kg (内バラスト130 kg)
総重量	1145.2 kg
自由浮力	116.8 kg (10.2%)
総浮力	1262.0 kg

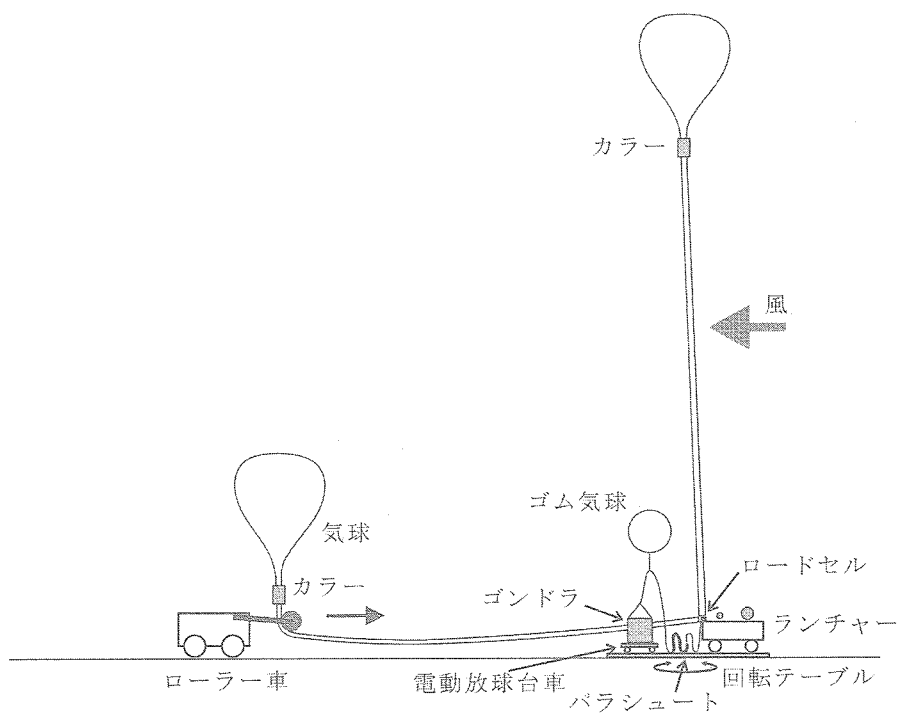


図1 立て上げ放球法

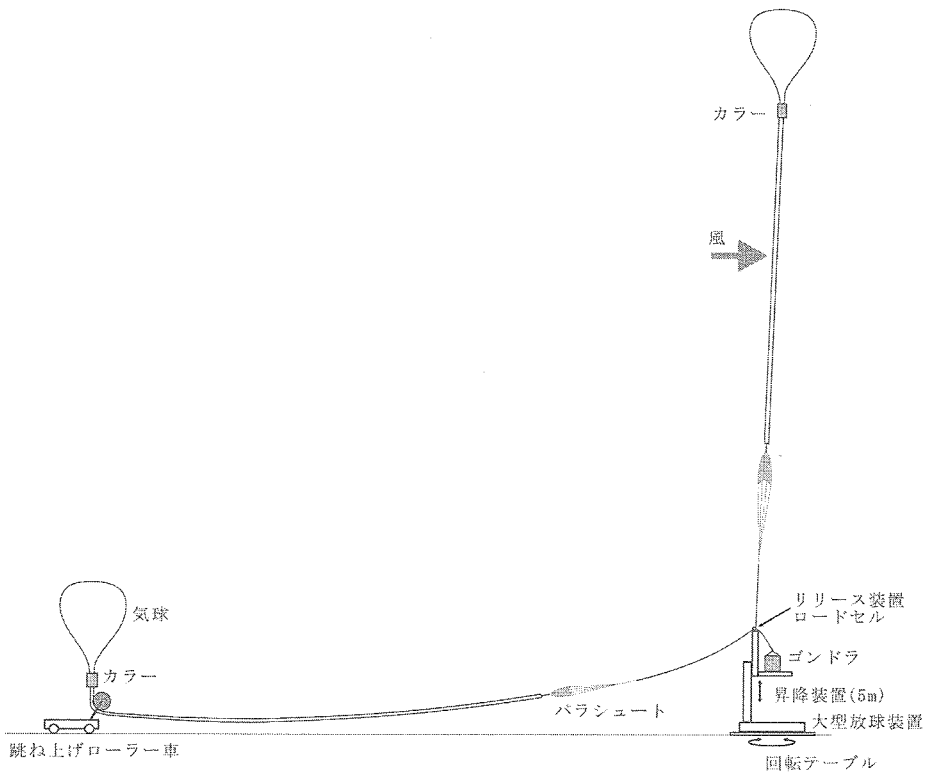


図2 セミダイナミック放球法

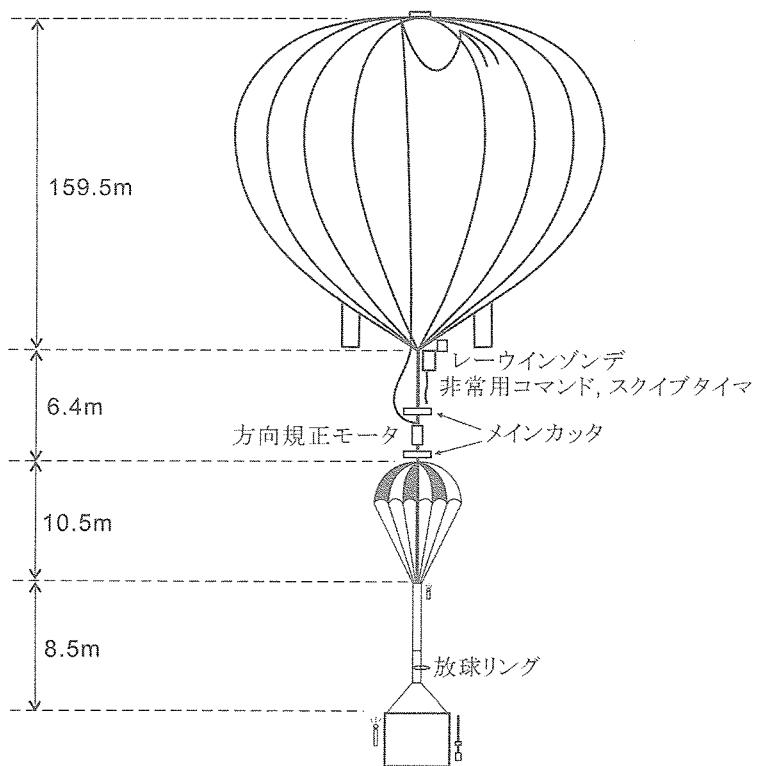


図3 B500-2の荷姿

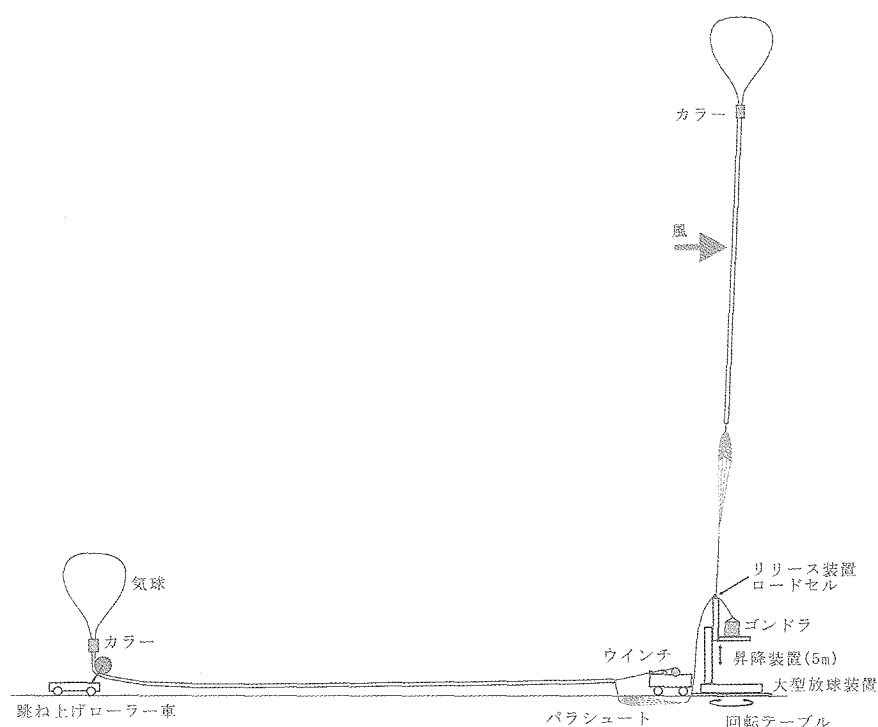


図4 B500-2の放球方法

4. 放球および飛翔結果

B500-2号機の観測目的は、中性子星やブラックホール候補星等からのガンマ線を非常に高い精度で検出する新しいテクノロジーを切り拓くことにある。新しい概念に基づいた半導体検出器とシンチレータ検出器を1台ずつ搭載した。ゴンドラの方位角の制御を行うために、方向規正用モータをパラシュートの直上に搭載しており、これより下のパラシュート、荷姿はマルチリングによる構成となっている。

図5は大型放球装置の昇降台にセットされたゴンドラの写真である。ゴンドラに接続されたパラシュートは気球尾部に接続されている。気球にヘリウムガスを入れているところを図6に示す。立て上げ用ランチャーに取り付けてあるウインチに気球尾部が接続されている。ガスをつめた後の様子を図7に示す。その後のウインチロープ操作による気球の伸張はスムーズに行われ、跳ね上げローラーの開放時には、図8に示すように三陸地方特有の霧の中に入ってしまったが、気球下部の状態を確認し、カラーの分離を行った。カラーの落下を確認した後に、放球を行った。図9は霧をぬけて上昇していく気球の様子である。

B500-2号機は、2003年9月3日17時37分に打ち上げられ、225 m/minの速度で正常に上昇した。この気球では、観測時間のウィンドウを合わせるために、排気弁とバラストによる飛翔制御を行っている。まず、高度14 kmに到達したところで排気弁を開き上昇速度を80 m/minまで落とし、強い西風によって気球を東方沖合200 kmまで出した。そして、高度20kmに到達したところで、バラストを投下して上昇速度を上げた。気球は180 m/minの速度で上昇し、放球から5時間53分後に、130 kmの沖合いで水平浮遊状態に入った。図10および図11にこの気球の航跡図と飛翔高度の時間変化を示す。その後、気球は東風により西方に進み、翌日01時25分に三陸大気球観測所上空に到達した時点で、指令電波を送信し観測器を切り離した。観測器は三陸大気球観測所の東方30 kmの海上にパラシュートで緩降下した。観測器および気球は翌朝早くに、ヘリコプターと回収船を用いて、無事に回収された。観測システムも正常に動作し、目標天体の追尾、データ受信ともに成功した。

5. おわりに

三陸大気球観測所の放球場先端部を拡張して設けられた、回転機構と昇降台を備えた大型放球装置、ならびに、自走式跳ね上げローラー車の開発により、セミダイナミック放球法が確立された。2003年9月3日にB500-2号機の放球および飛翔に成功した。この気球の容積は500,000立方メートルであり、これまで日本において打ち上げと飛翔に成功した最大容積の気球である。この気球は、国産の気球用に最適化されて開発されたポリエチレンフィルムを用いて製作された。この気球の成功により、成層圏上部における長時間観測に道が開かれた。新しいセミダイナミック放球法により気球はより安全に打ち上げ可能となり、また、放球時にゴンドラにかかるショックもほとんどなくなった。立て上げ放球法と比較して気球頭部への最大負荷が小さくなったこととあわせて、より大型の気球を三陸大気球観測所のような狭いフィールドでも安全に打ち上げることが可能な環境が整った。今後、さらに大容積の気球の開発を行う予定である。

参 考 文 献

- [1] 秋山弘光, 他: 立て上げ放球法, 宇宙科学研究所報告 特集, Vol. 4, 3-16, 1982.
- [2] Akiyama H., et al.: A new static-launch method for plastic balloons, Adv. Space Res., Vol. 3, 97-100, 1983.
- [3] Nishimura J., et al.: The improvement of the static launch method in Japan, Adv. Space Res., Vol. 13, 63-66, 1993.
- [4] 並木道義, 他: 大型気球放球装置, 平成11年度大気球シンポジウム, 1999.
- [5] 並木道義, 他: 大型放球装置用跳ね上げローラー車の開発, 平成13年度大気球シンポジウム, 2001.
- [6] 並木道義, 他: 大型放球装置を使用した大気球の放球, 宇宙科学研究所報告 特集, Vol. 41, 25-34, 2001.
- [7] Yamagami T., et al.: Semi-dynamic launching method for scientific balloons, Adv. Space Res., Vol. 30, 1145-1148, 2002.
- [8] 斎藤芳隆, 他: 超薄膜型高高度気球の開発 (BT*30-1), 宇宙科学研究所報告 特集, Vol. 44, 16-25, 2002.
- [9] 斎藤芳隆, 他: 超薄膜型高高度気球による世界最高気球高度記録の達成 (BU60-1), 宇宙科学研究所報告 特集, Vol. 45, 1-10, 2003.



図5 大型放球装置にセットされたゴンドラ

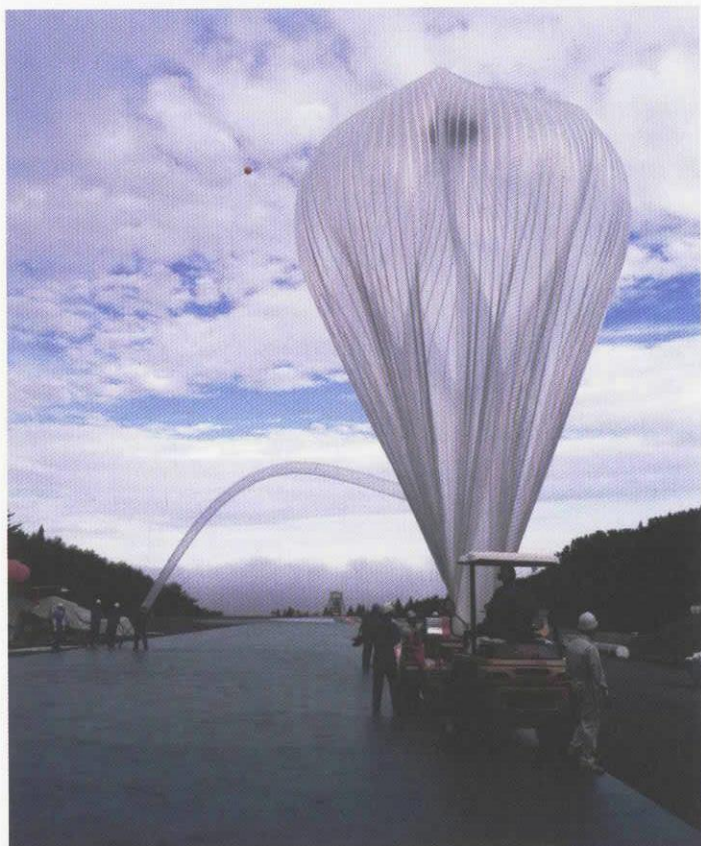


図6 気球へのガス注入



図7 ウインチロープの繰り出しによる気球頭部の立て上げ



図8 跳ね上げローラーの開放

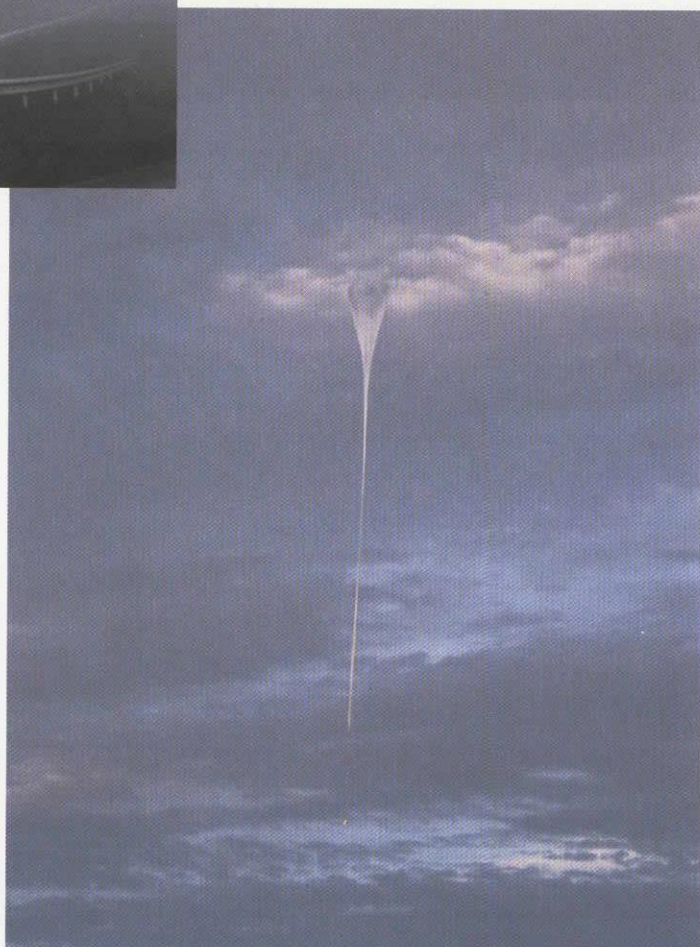


図9 霧を抜けて上昇するB500-2気球

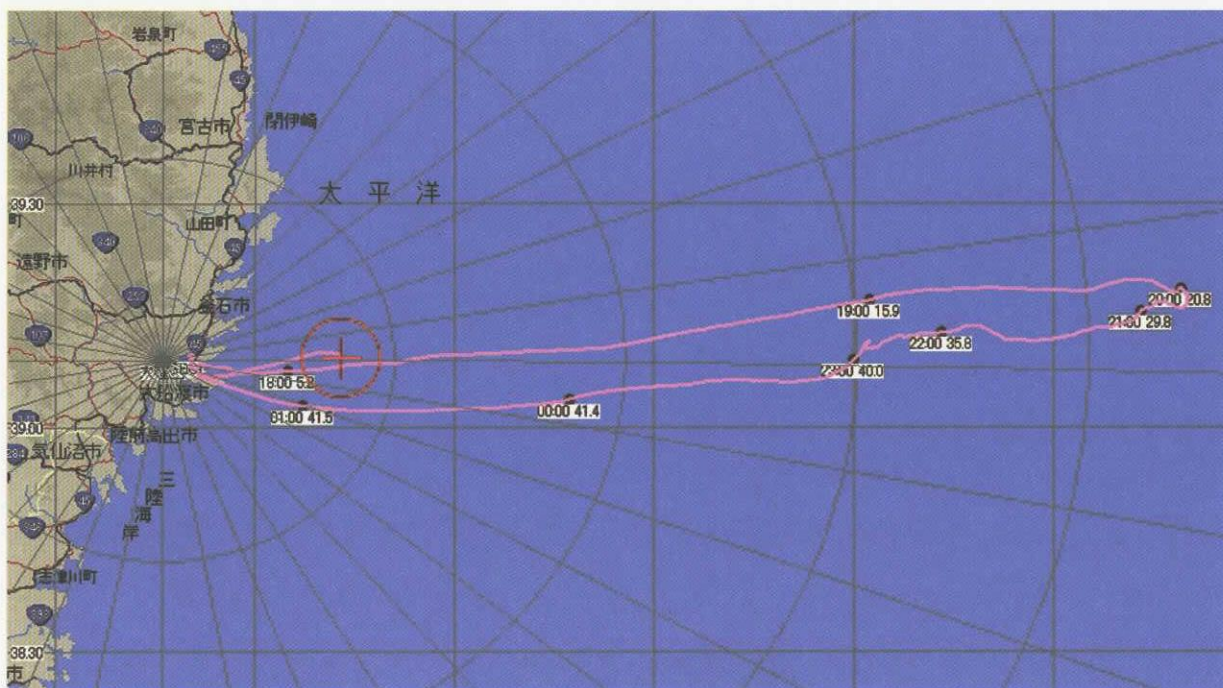


図10 B500-2の航跡図

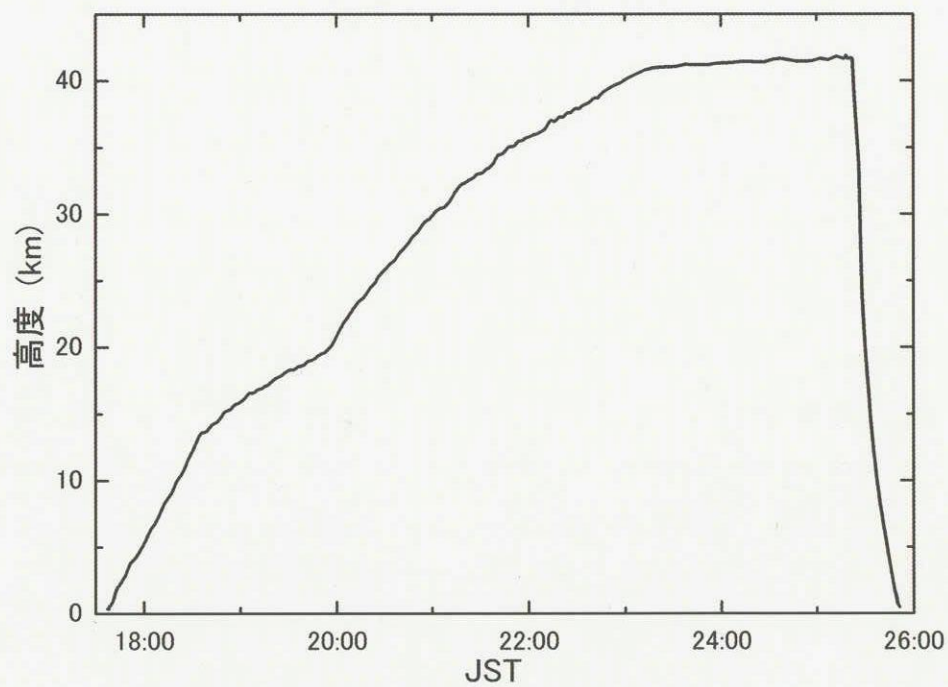


図11 B500-2の高度の時間変化