

大気球を用いた観測の将来



宇宙線研究所将来計画に向けた勉強会
第5回「飛翔体を用いた観測の将来」

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部
大気球観測センター 吉田 哲也

大気球観測プロジェクト

□ 歴史・実績

- 1954年 日本で初めて大型ポリエチレン気球を放球
- 1965年 東京大学宇宙航空研究所に気球部門発足
- 1971年 茨城県大洋村、福島県原町を経て、
岩手県大船渡市三陸町に恒久気球建設
- 2003年 JAXA発足に伴い、ISAS大気球観測センターに改組

□ 放球機数

- 1966年から現在に至るまで、591機の気球を放球
- 三陸大気球観測所では405機の気球を放球
- 最近は、年間10機から15機の気球を放球
- 2005年からはブラジルでの大型気球による気球実験を実施
(年最大2機)

飛翔体の比較(気球から見た)

	大気球	ロケット	衛星
観測時間	△ (時間～月)	× (秒～分)	◎ (年)
搭載機器	○	×	×
機動性	○	△	×
回収	○	×	×
経費	○	× (1桁高額)	× (2桁高額)

気球実験の目的

- 天文
 - 星の生成、発生機構、構造
- 宇宙線
 - 宇宙線源、加速機構、伝播機構
- 地球物理
 - 地球の温暖化、地球環境、大気循環、オゾン破壊、生命
- 宇宙工学
 - 将来ミッションの実証実験
- 飛翔性能試験
 - 新型気球および搭載機器の飛翔試験

2005年の国内放球実績

日付	気球型式	実験目的	飛翔高度	飛翔時間
2005年5月21日	BVT60-1	超薄膜高高度気球飛翔性能試験	4.8 km	1h 13m
2005年5月25日	B200-4	硬X線背景放射観測	38.6 km	5h 23m
2005年5月29日	B200-5	ソーラーセイル展開試験	36.9 km	5h 07m
2005年6月2日	B15-85	スーパープレッシャー気球飛翔性能試験	29.3 km	4h 34m
2005年6月6日	B15-86	成層圏微生物採集	20.0 km	23h 05m
2005年8月28日	BU60-2	大気重力波および成層圏オゾン観測	51.5 km	2h 45m
2005年8月29日	B30-71	スプライト・雷の光学および電波観測 夜光の観測 (for EUSO on ISS)	33.8 km	7h 00m

天文

宇宙線

地球物理

宇宙工学

気球技術

2006年の国内放球実績

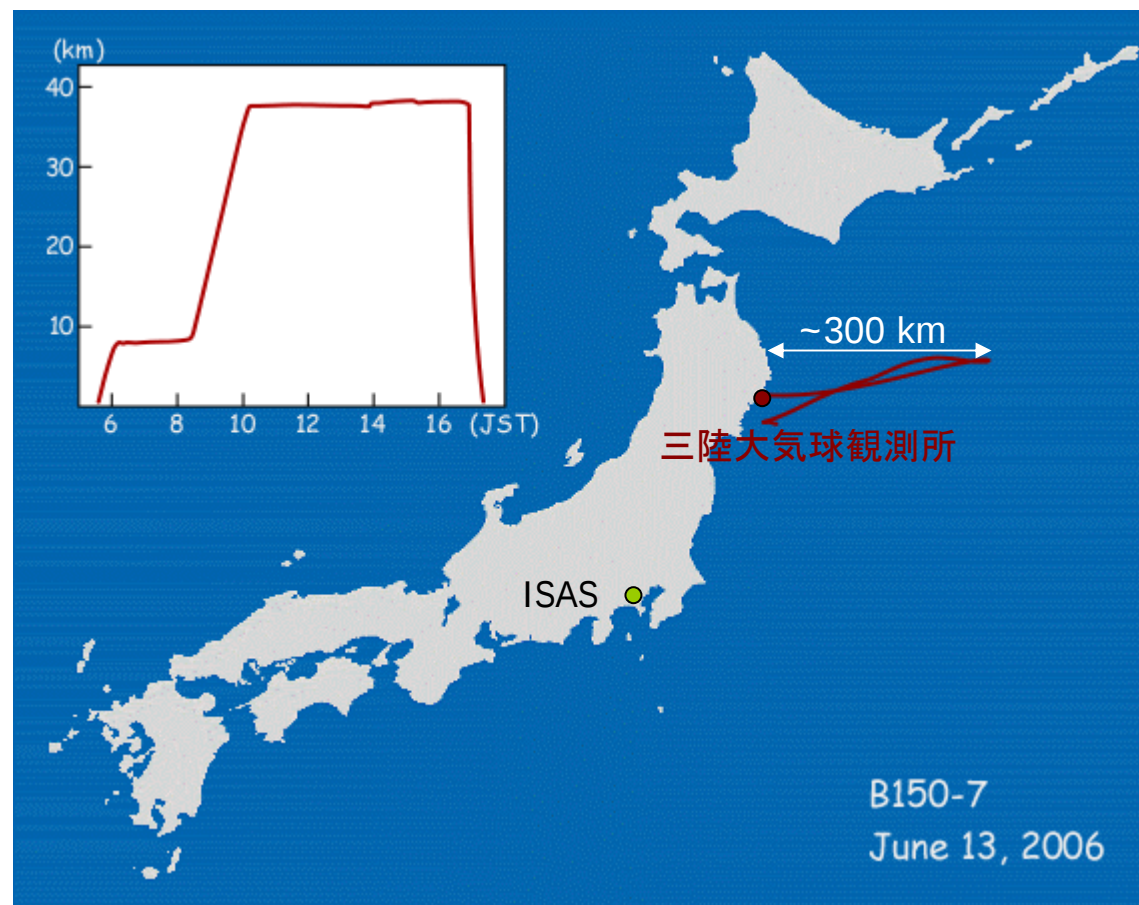
日付	気球型式	実験目的	飛翔高度	飛翔時間
2006年5月27日	B200-6	無重力実験システムの動作試験	41.2 km	4h 10m
2006年5月31日	B100-14	高エネルギー電子・ガンマ線観測	36.0 km	6h 20m
2006年6月 3日	B100-15	成層圏クライオサンプリング	35.2 km	6h 30m
2006年6月 8日	B15-87	スーパープレッシャー気球飛翔性能試験	29.2 km	4h 30m
2006年6月13日	B150-7	かに星雲からの偏光硬X線観測	37.8 km	12h 05m
2006年8月25日	B5-134	スプライト・雷の光学及び電波観測	36.2 km	6h 15m
2006年8月30日	B200-7	ソーラーセイル展開試験	37.0 km	4h 09m
2006年9月1日	B100-16	宇宙拡散・大気ガンマ線観測	35.0 km	7h 38m
2006年9月2日	B15-88	スーパープレッシャー気球飛翔性能試験	25.5 km	2h 08m
2006年9月4日	B200-8	サブミリ波によるHO ₂ の日変化観測	37.9 km	7h 57m
2006年9月13日	BVT60-2	超薄膜高高度気球飛翔性能試験	15.6 km	1h 52m

天文 宇宙線 地球物理 宇宙工学 気球技術

国内実験

□ 三陸大気球観測所での気球実験

- 5~6月 および 8~9月
- 高度40~45 kmで
3~20 時間の飛翔
- “ブーメラン気球”
- 太平洋上で回収

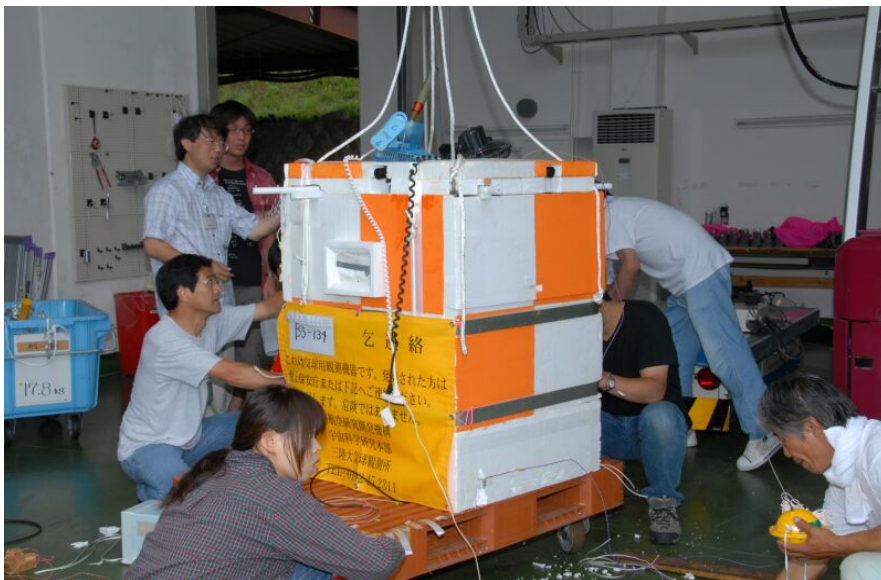
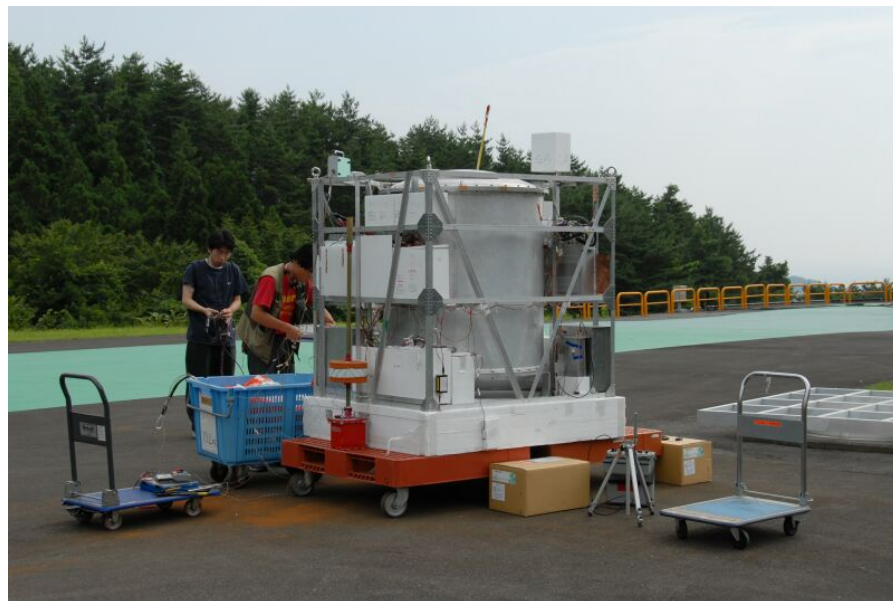


三陸大気球観測所

- 170 m^L × 30 m^W 放球パッド
 - スタティック放球法、セミダイナミック放球法
- 各シーズン5~6機を3~4日間隔で放球
- 年間10~12機
- ペイロード重量:
数十 ~ 500 kg
- 気球満膨張体積:
5,000 ~ 500,000 m³



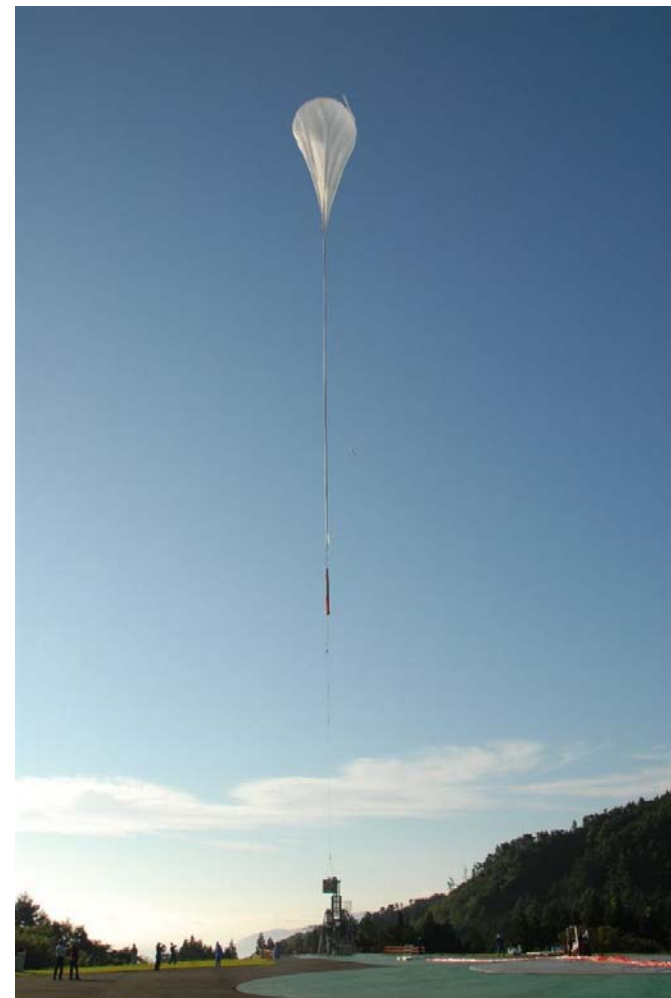
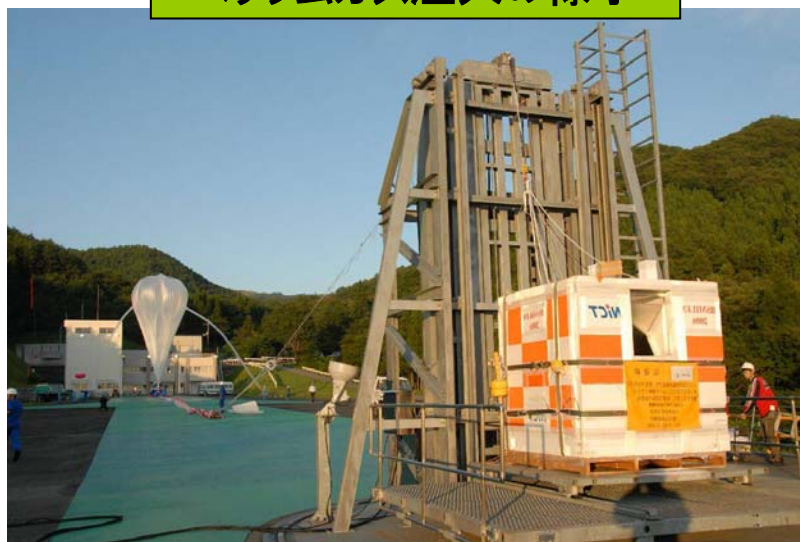
観測器組み立て・調整風景



気球放球風景・様子



ヘリウムガス注入の様子



大型放球装置から観測器放球

観測器・気球回収の様子



漁船・湾岸工事船による観測器・気球回収



ヘリコプターによる観測器回収

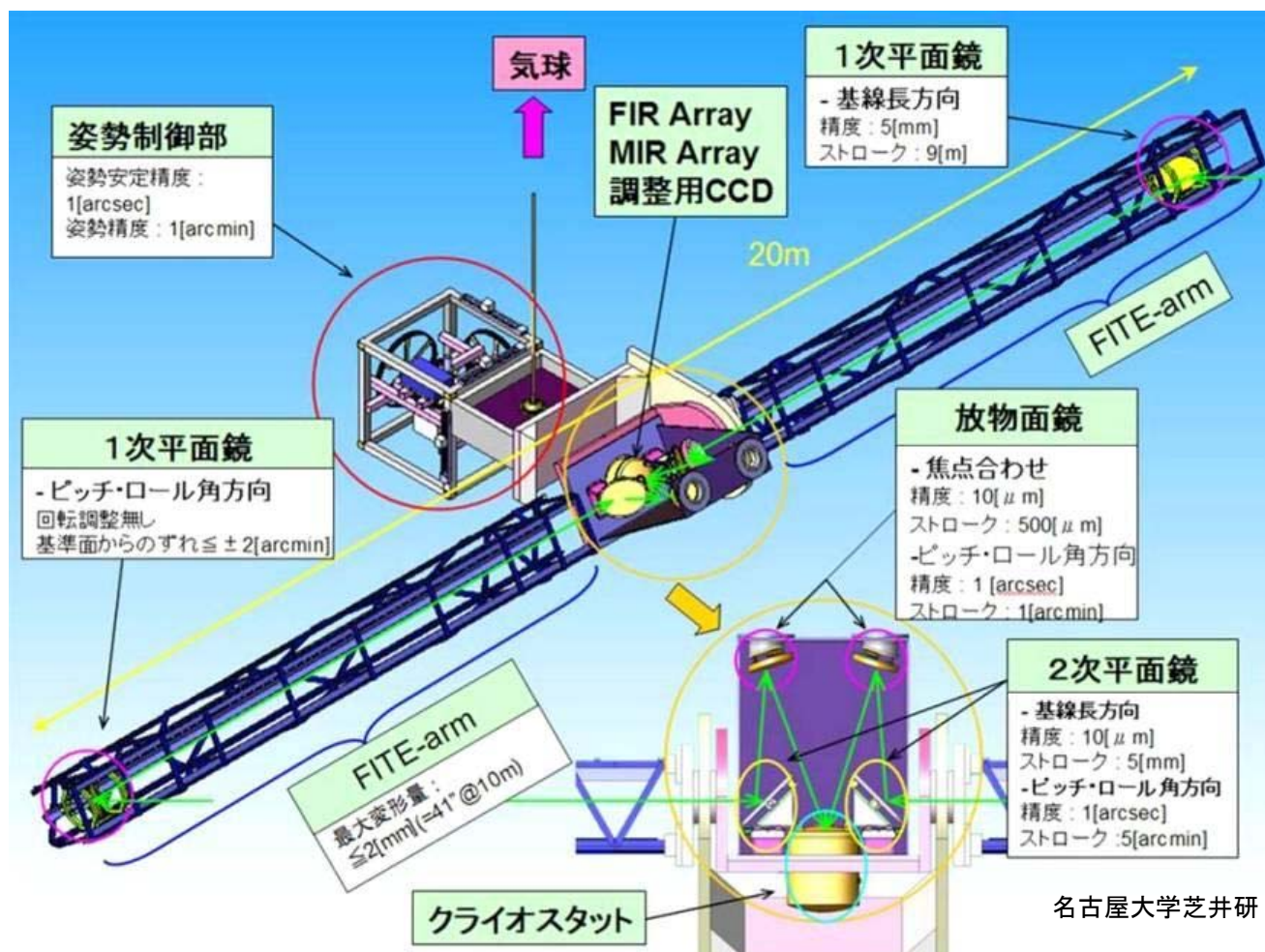
ブラジル実験 (I)

- 2005年から6年計画
- ブラジルINPEの気球部門との国際共同実験
- 硬X線撮像望遠鏡 (SUMIT)
 - ペイロード重量 1,270 kg
 - 2006年11月19日放球
 - 鏡筒長 8 m
 - B500により高度38 km



ブラジル実験 (II)

- 遠赤外線干渉計 (FITE) ペイロード重量 1,500 kg
 - B300により高度34 km



大気球観測テーマの採択と実施手順

観測テーマの公募(毎年10月～11月)

大気球専門小委員会において採択案作製(12月～1月)

大気球専門委員会において採択案決定(1月頃)

ヒヤリングにおいて年度実行予算の要求(1月～2月)

実行予算の決定および観測テーマの決定(2月)

宇宙工学・宇宙理学委員会を経て、本部会議で承認(3月～4月)

実験実施は、プログラム委員会・本部会議での承認を経て、実施

標準的仕様

- ペイロード重量 最大 500 kg (バラスト含む)
 - 安全確保の自主規制
- ペイロード大きさ 2 m^W × 2 m^D
 - 大型放球装置のステージサイズ
- 到達高度 < 52 km (ペイロード重量 < 3 kg、BU60)
 < 42 km (ペイロード重量 < 300 kg、B300)
- 飛翔時間 < 10 h

- テレメトリ 64 kbps PCM + 白黒ITV 1系統
- コマンド ディスクリートコマンド 9 ch

- 回収 太平洋上での船舶による回収

最先端成層圏気球とは？

- より重いペイロードを、より高く、より長時間飛行させたい!
 - 大型気球 (米国、日本)
 - 薄型高高度気球 (日本)
 - スーパープレッシャー気球 (日本、米国)
- よりよい実験環境を提供できる!
 - 精密姿勢(方向)制御
- より高度な飛翔制御
 - 高度制御・航跡制御

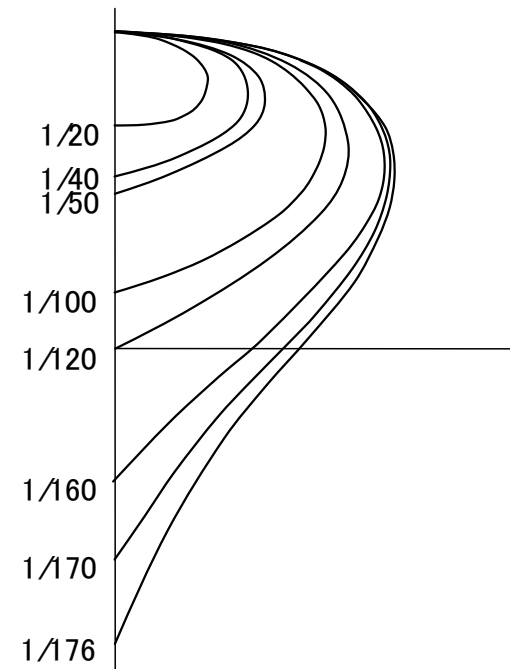
世界での取り組み

- Committee on Space Research (COSPAR)
 - Panel on Technical Problems Related to Scientific Ballooning (PSB)
 - Task Group on Long Duration Stratospheric Balloon Flights (LDSBF)
 - Scientific Assembly (隔年、06年北京)
 - 'New Era in Ballooning for Advanced Scientific Missions' (PSB1)
 - Advances in Space Research (Elsevier)
- 日本(ISAS/JAXA)、米国(NASA, NSBF)、フランス(CNES)、インド(TIFR)、中国、ブラジル(INPE)、...

より重いペイロードをより高く

□ ゼロプレッシャー気球

- 通常使われている成層圏気球はゼロプレッシャー気球
- ダクトを通して気球の内外が繋がっている
- 気球内外で圧力差がない
 - 自然型気球
 - 体積・全長一定
 - 浮力最大
 - 周方向はたるんでいる
 - 子午線方向にのみ応力



ゼロプレッシャー気球の到達高度

□ 到達高度

■ $P \text{ (hPa)} = 850 W \text{ (kg)} / V \text{ (m}^3\text{)}$ (高度35km以上)

□ W: 気球システム的全重量

□ V: 気球満膨張時体積

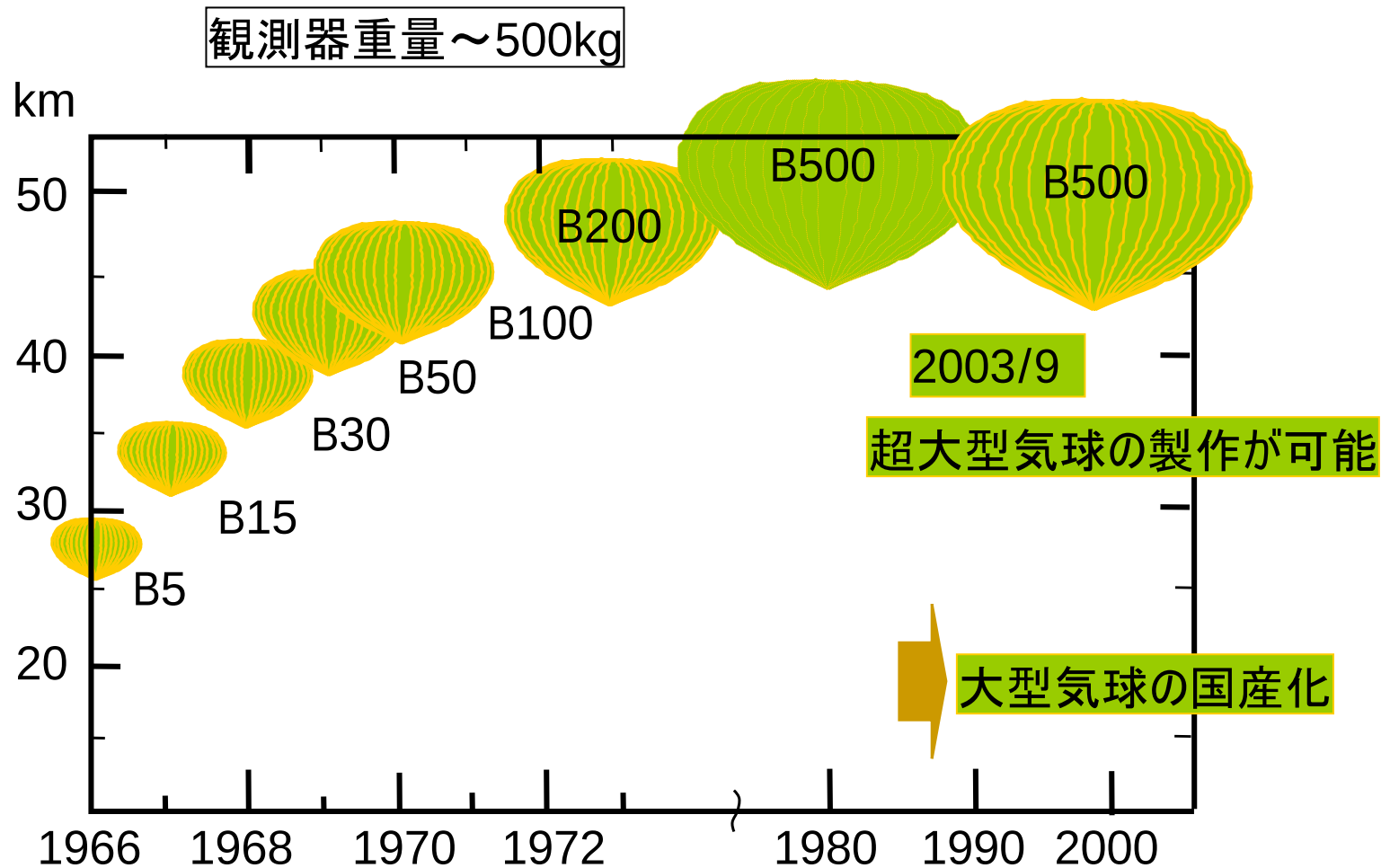
- より重いペイロードを高高度まで上げるには、大きな気球が必要
- ただ大きな気球を作ると、気球重量が重くなる
- 気球本体は軽く、体積は大きく!

大型気球

□ 大型気球

- 数百kg ~ 2トン強のペイロード
- 35 km ~ 40 kmの高度
- 満膨張時 直径 100 ~ 150 m
- ポリエチレンフィルム: 20 μ m厚
- 地上での最大応力を緩和するためにキャップをつける

日本における20 μ m気球の開発経過



藤倉航装製大型気球

気球容積 (m ³)	呼称名	気球重量 (kg)	パイロード重量 (kg)	到達高度 (km)
15,000	B15	75	100	32.5 (8 hPa)
30,000	B30	120	200	35.4 (5 hPa)
50,000	B50	170	500	33.1
100,000	B100	270	500	35.2
200,000	B200	420	500	38.7
500,000	B500	850	500	42.4 (2 hPa)

- フィルム厚 20 μ m
- キャップなし
- その他 10 μ mフィルムで作られたもの、
キャップありなどバリエーション多数
 - パイロード重量と到達高度にあわせた気球設計
 - ほとんどオーダーメイドで設計する

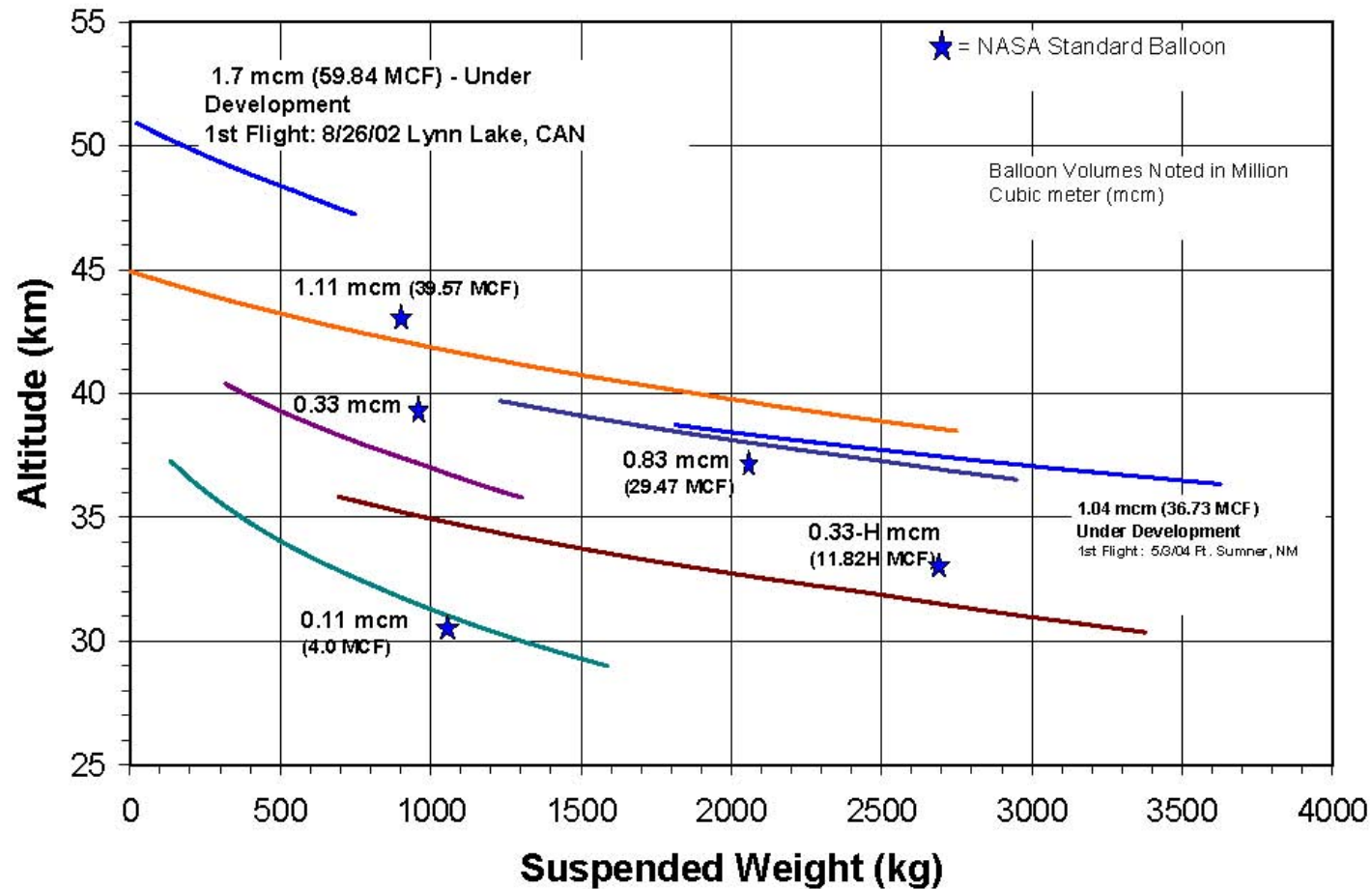
重量500kg:国内での自主規制

Raven製大型気球

- 世界最大: 1.7 Mm³、ゴア全長 215 m
 - 690 kgのペイロードを高度49 kmで浮遊
- 1.11 Mm³, 3-capの後継機として1.04 Mm³の気球を開発中

VOLUME	MODEL NUMBER	WEIGHT	PAYLOAD (min)	PAYLOAD (max)
Mm ³		kg	kg	kg
0.11	SF3-4.001-.8/.8-NA	422	45	1587
0.33	SF3-11.82-.8/.8-NHR	731	45	1304
0.33	SF3-11.82-.8/.8/.8/.8-NHR	1378	45	3379
0.83	SF3-29.47-.8/.8/.8-NHR	1647	45	2948
1.11	SF3-39.57-.8/.8/.8-NHR	1816	45	2748
(1.11)	SF3-39.57-.8/.8/.8/.8-NHR	2266	45	3628

Raven製大型気球



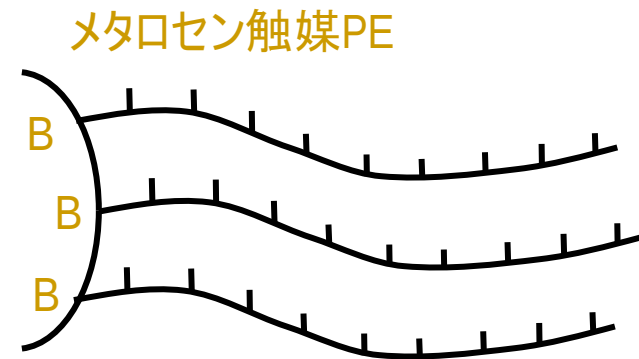
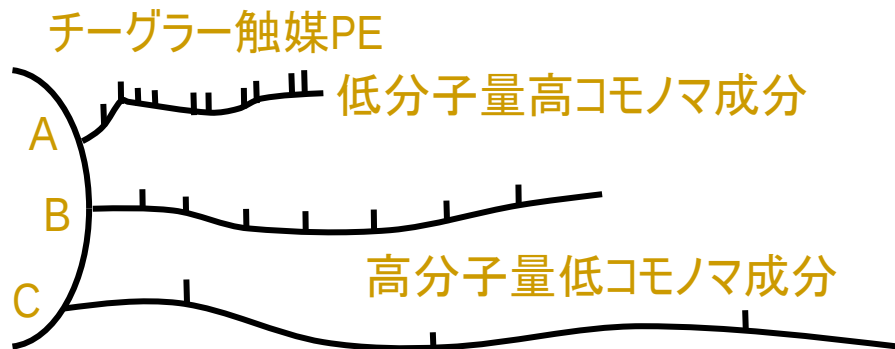
薄膜高高度気球

- 大きな気球を作れば、気球重量が重くなる
- 軽量のペイロードを打ち上げる場合には効率的でない
- 気球フィルムを薄くして、気球重量を軽減する

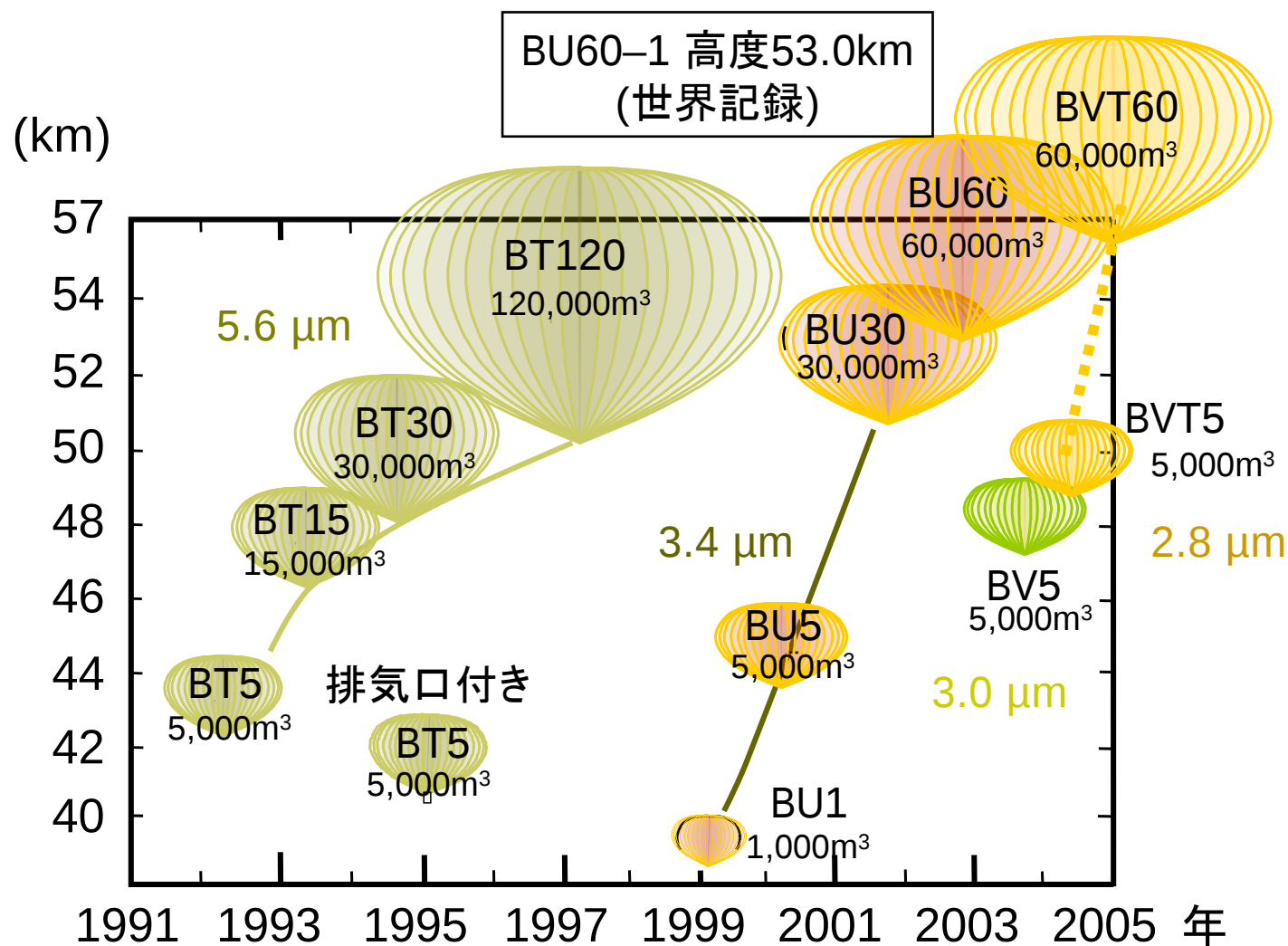
- しかし、強度のある薄い気球フィルムを作るのは容易でない
 - 均一な強度を持つ薄膜フィルムをどのようにつくるか

薄膜ポリエチレンフィルム製法

- エチレンの重合
 - 高密度ポリエチレン
 - 規則正しい構造をしていて引っ張りに強く、不透明
 - 常圧で製造するため、触媒が必要
- 分子量分布が揃っている触媒のほうが、薄膜フィルムを作り易い
 - メタロセン触媒の実用化 (1996年)
 - 5.6, 3.4, 3.0, 2.8 μm フィルムが製作できる



高高度気球の開発経過



BU60-2 (3.4 μm フィルム)

- 大気重力波および成層圏オゾンの観測
 - 2005年9月28日打上げ
 - 科学観測器: 3.4 kg
 - 高度51.8 kmで気球破壊を指令



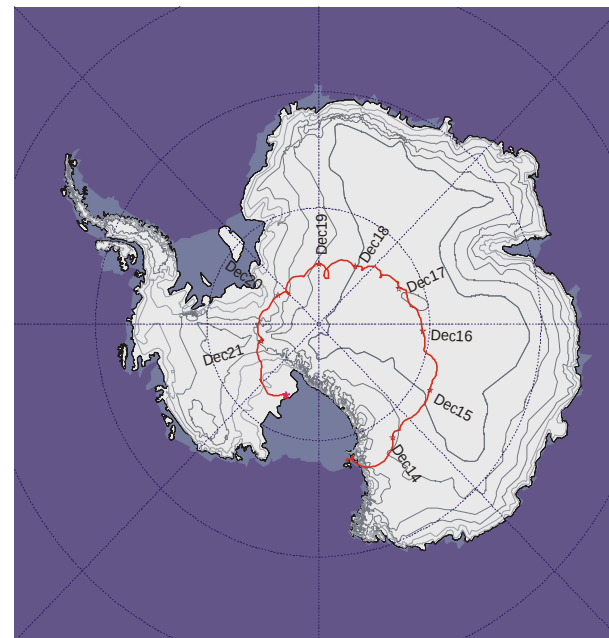
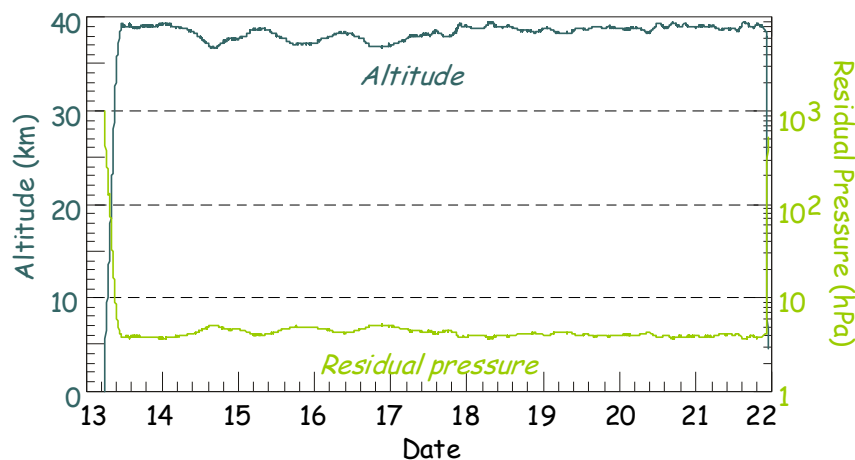
より長時間

□ 日没補償

- 日中は太陽からの熱で気球ガスが温められている
- 日没後は太陽の照射がなくなる
 - ガス温度が低下する
 - 体積が減少して浮力を失い、降下する
 - 大気圧の増加で体積が減少する
 - 降下を続ける → Positive feedback
- 日没後直ちに総重量の7～10%のバラストを投下してパイロード重量を減少させ、高度を維持する
- 日の出とともにガス温度は上昇し、ガスを排気する
- 長時間飛翔しようとするとはほとんどバラストを飛ばすことになる

バラストによる日没補償からの脱却

- 日没と日の出が繰り返さない
 - 極地域の白夜環境での飛翔
 - 南極周回気球
 - 緯度によっては太陽高度の変動で気球が降下する

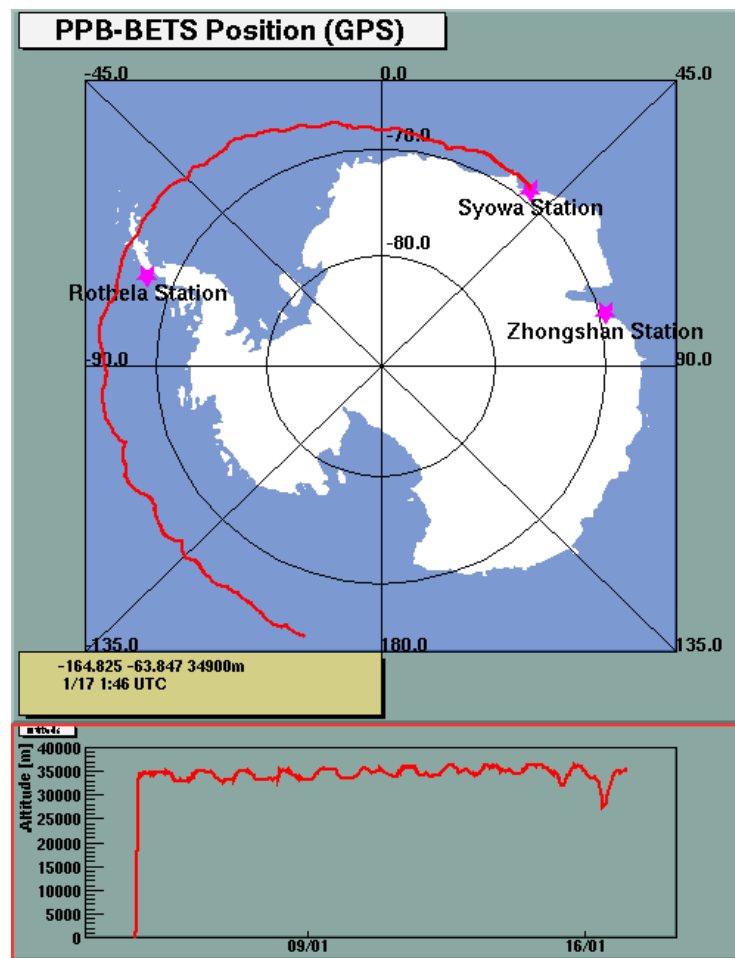


- ガスを排気しない
 - スーパープレッシャー気球

南極周回気球 (PPB)

□ 日本・昭和基地 (回収なし)

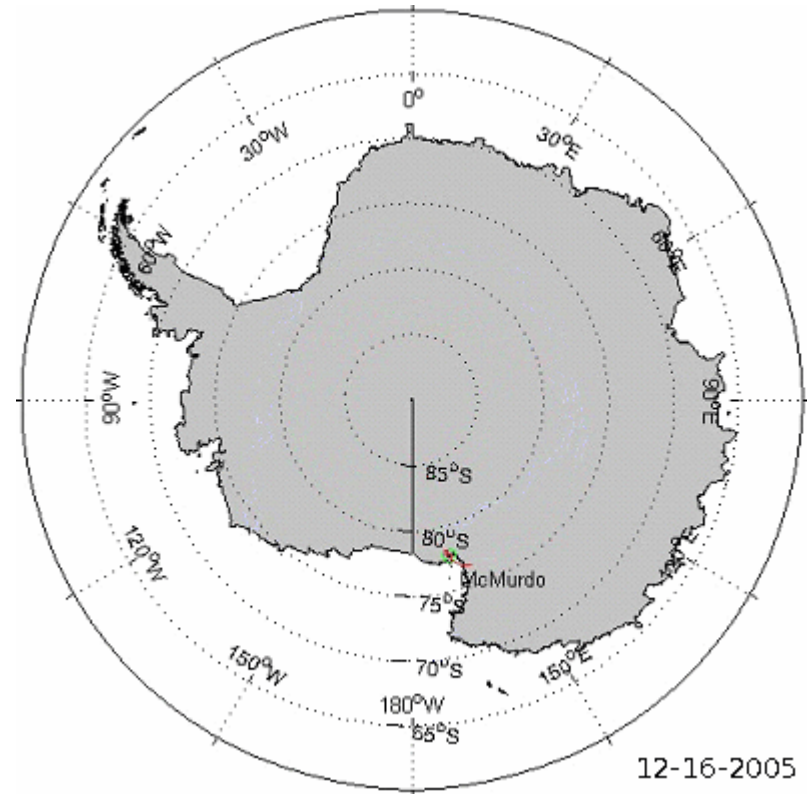
- PPB-BETS
- B100
- ペイロード: 200kg
- バラスト: 280kg
- 14日間



南極周回気球 (Antarctic LDB)

□ 米国・マクマード基地

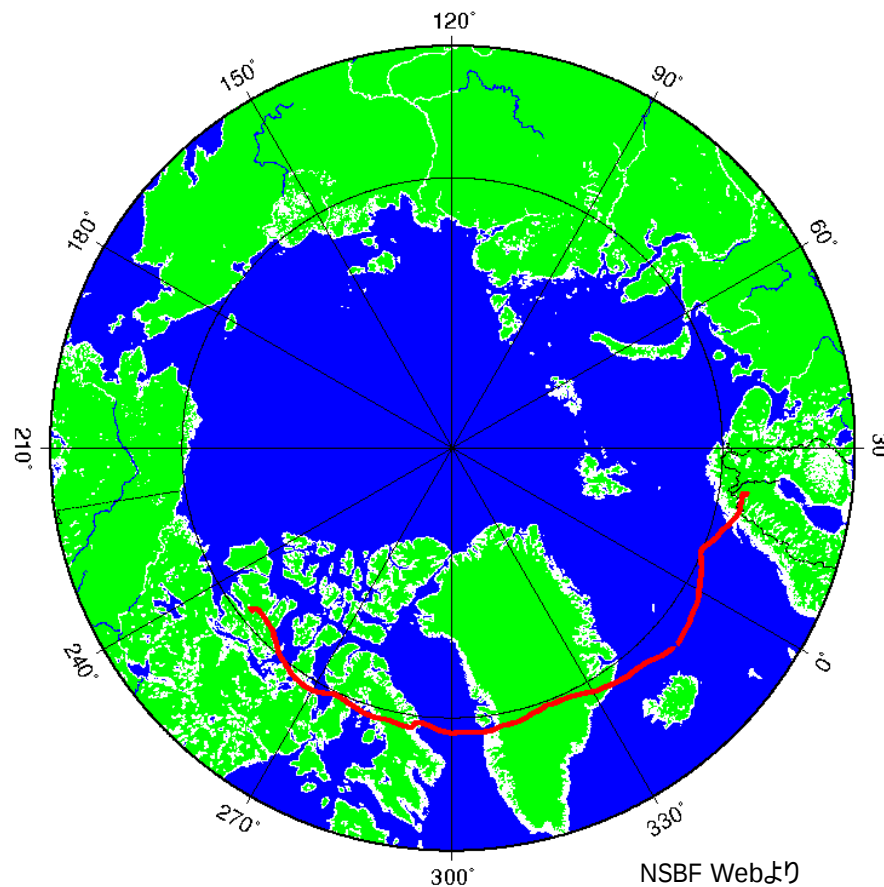
- BESS-Polar、ATIC
CREAM、Tiger、Tracer
ANITA
- ペイロード: 1,950kg
- バラスト: 150kg
- 39 mcf, 2-caps
- 最長42日間
- 回収可能



CREAMグループ Webより

北半球長時間飛翔気球

- スウェーデンからカナダへ
 - NASAが2004年から年1機
 - 2006年からは年2機?
 - 5～7日間
 - 日没あり
 - アクセスが南極に比べ容易である?



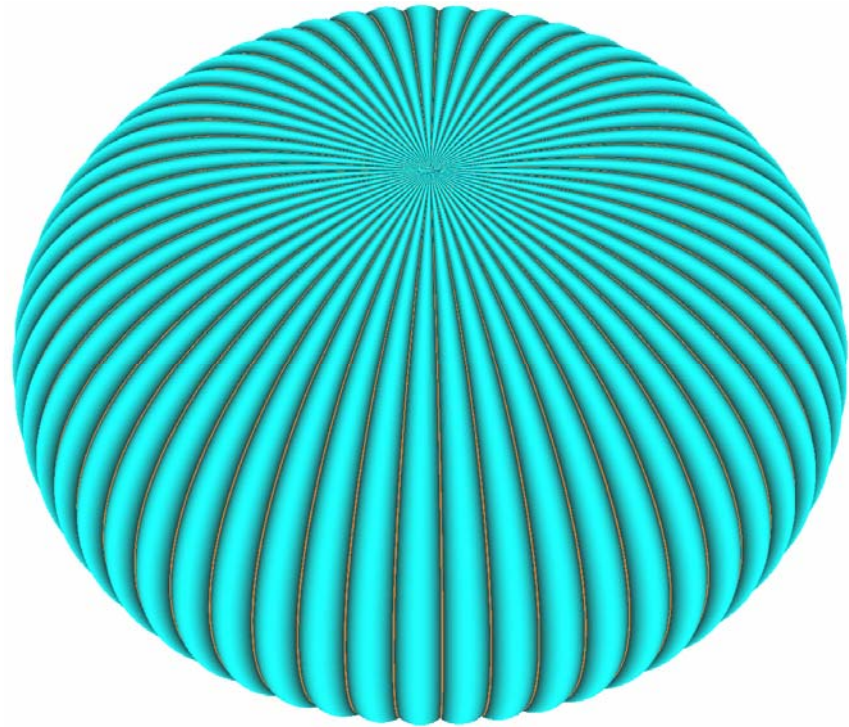
スーパープレッシャー気球

- 昼夜で気球の体積変化がほとんどない (形状を維持)
- 夜間にガス温度が最も低下した場合でも底部で正の圧力差
- 昼間にガス温度が最も高くなった時の圧力差に耐えられる

- 高度35 km (日本付近)
 - 昼夜のガス温度差は最大30°C程度
 - 昼夜の気球内外の圧力差は最大100 Pa程度
 - 設計最大圧力差: 周囲の大気圧の20%
 - 圧力差としては極めて小さい
 - 実際、打ち上げ時の気球の上部には、
地上で100 Pa程度の圧力差が作用している

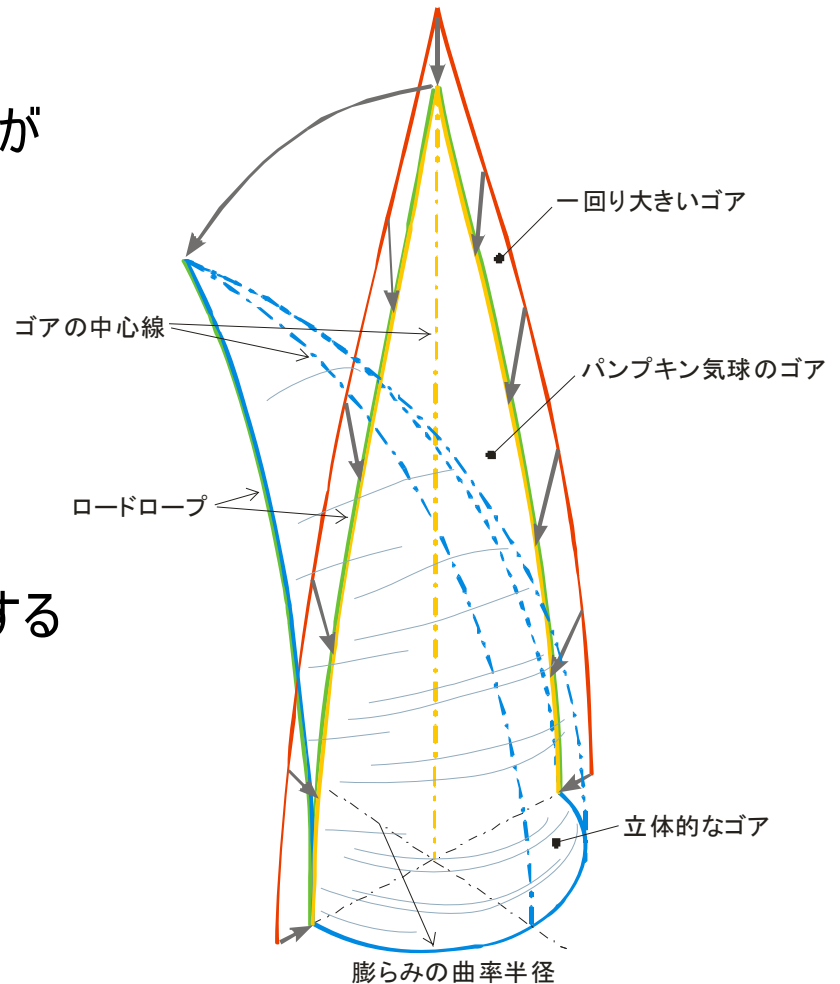
スーパープレッシャー気球の形状

- 半径の大きな球形にしてしまうと
非常に比強度の高いフィルムが必要
 - 比強度: 単位密度辺りの強度
(長さの単位)
- Lobed Pumpkin型気球
 - 気球の大きさと無関係に
局所曲率半径を小さく
 - どのように一枚のゴアから
膨らみのある立体形状を
作り出すか



ゴアの立体化

- 1枚のゴアから膨らみ(バルジ)のある立体形状を作る
- 周方向局所曲率半径(バルジの半径)が制限値を超えない
- ゴアの膨らみ(張り出し)に必要な余分のフィルムをゴアに付加
- ゴアの縁を縮めて(しわ寄せ)伸びないロードテープに固定する
- 立体形状はフィルムの伸びによらずに(フィルムに負荷をかけずに)形成する



膨らみの曲率半径

スーパープレッシャー気球用フィルム

□ HEPTAX BH25

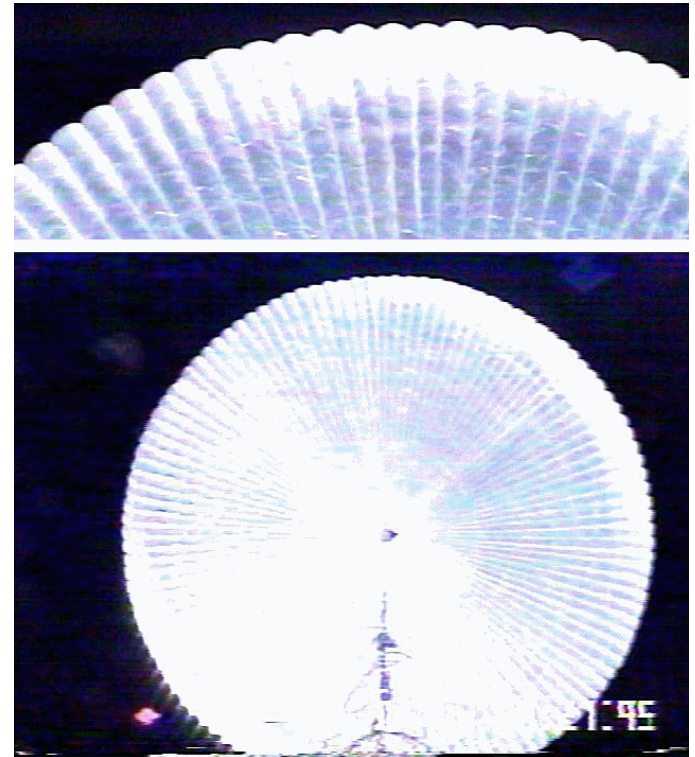
- ポリエチレン+ナイロン+EVOH(エバール)
- ガスバリア性、強度、両面ヒートシール可能
- 25 μm 厚 (5 μm 層 $\times$ 5)
- 重量: 26.425 g/m²
- 破壊強度: 86 MPa(常温) 130 MPa(−40°C)
 - 30 μm 厚 ポリエチレンフィルムの3倍

ロードロープ

- 縦方向張力はロードロープが受け持つ
 - ロードロープが全圧力を支える
 - 圧力は小さいが巨大な力が作用する
- 使用される材質
 - ポリアミド(ケブラー) 2.0×10^5 m
 - ポリアリレート(ベクトラン) 2.4×10^5 m
 - スペクトラ(ダイニーマ) 3.7×10^5 m
 - PBO(ザイロン) 3.8×10^5 m
 - (ポリエステル 0.8×10^5 m)
- 比強度、安定性、耐光性等全ての条件を満たしたロープはない

日本でのスーパープレッシャー気球開発

- 1998年頃からナイロン・ウレタンフィルムでのR&D
 - フィルムが重く、製作工程が複雑
- 2001年からHEPTAX BH25を用いたR&D
- 2004年6月 PB15-1飛翔試験
 - 高度28.9 km
最大差圧36 Paで破壊
 - 大型圧力気球への
第1歩を踏み出すことができた
 - しかし地上試験の
1/20程度の圧力で破壊
- 地上試験を繰り返す



PB-60-1/3

- 60,000 m³の体積を持つスーパープレッシャー気球の1/3モデル
- 地上試験
 - 800 Paまで加圧
 - 必要耐圧の4倍
 - ガスを抜いて畳む
- 2006年に飛翔試験
 - B15-87、B15-88
 - 725 Pa 破壊
 - 1,230 Pa 破壊
- モデル気球での開発を完了
 - 実証機の開発



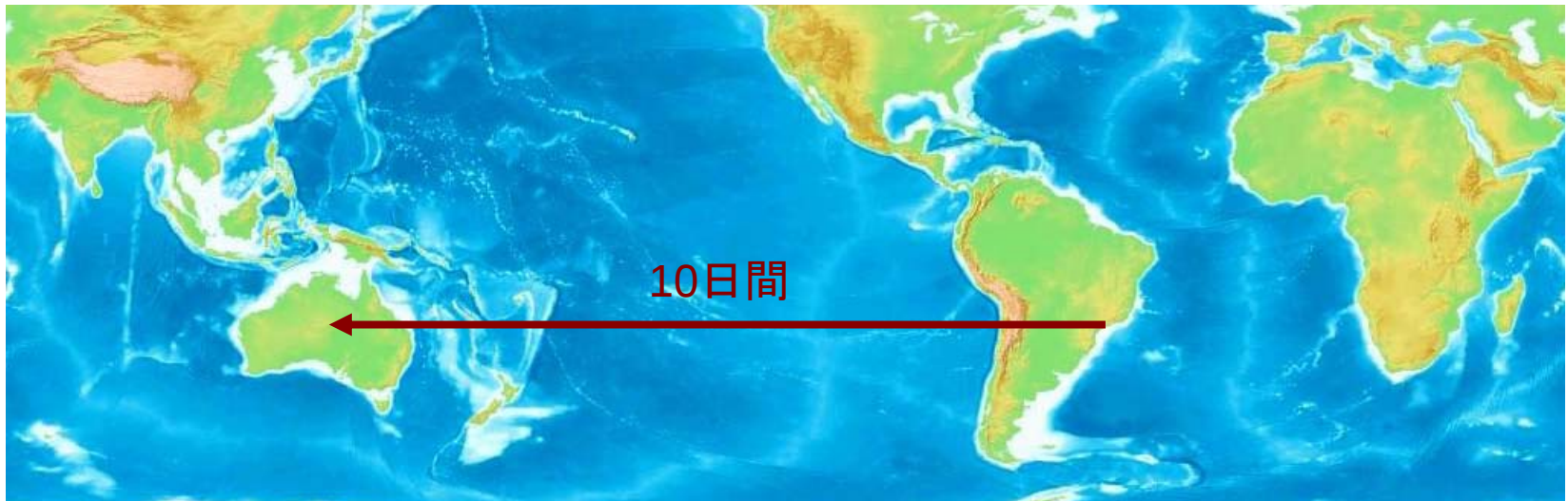
米国でのスーパープレッシャー気球開発

- NASA/Wallops Flight Facility (WFF)
 - Balloon Program Office (BPO)
 - Ultra Long Duration Balloon (ULDB) Project
 - オーストラリアで打ち上げで、最長100日間
- 2005年9月 0.17 Mm³のテスト
 - 1,360 kg, 30 km
- その後
 - 0.34 Mm³
 - 30 → 33.5 km
 - 0.51 Mm³
 - 1,360 → 2,720 kg



長時間気球飛翔の実用化

- 300,000 m³ スーパープレッシャー気球の製作
 - 2007年中に実証試験
- ブラジルーオーストラリア間飛翔 (約10日間)
- 地球一周 (約1ヶ月)



スーパープレッシャー気球による観測

- 飛翔時期: 1~2月 (安定した東風が必要)
- 飛翔時間: 2~3日間 (ブラジル上空) 2007年飛翔試験
10日間 (ブラジル-オーストラリア) 2008年飛翔試験
1ヶ月間以上 (地球一周) 2010年飛翔試験
- 気球型式: PB300 (満膨張体積 300,000 m³、気球重量 1,200 kg)
- 吊下げ重量: 450 kg (サイエンス重量 300~350 kg)
サイエンス重量には電源システムを含む
- 飛翔高度: ~37 km
- コマンド・テレメトリ: インマルサットによる64 kbps (双方向? ダウンリンク?)
イリジウムによる2400 bps (アップリンク? 双方向)
- 追尾: GPS情報による。バックアップとしてアルゴス情報を用いる
- 回収: オーストラリアもしくはブラジルでの陸上回収を目指す

大気球観測所移転計画 (I)

- より重いペイロード放球の強い要求
 - ペイロード重量 > 1,000 kg
 - 気球満膨張体積 > 500,000 m³
 - システム全長 > 200 m
- 三陸大気球観測所の制約
 - 放球パッドの全長：170 m
 - 放球直後に吉浜の集落の上を上昇
 - 高度12~18 kmのジェット気球が不安定になってきている
 - 山間に立地しているためにガス注入時に予期せぬ突風に襲われる

大気球観測所移転計画 (II)

- 大気球観測所の移転先を検討中
 - 1候補：北海道大樹町



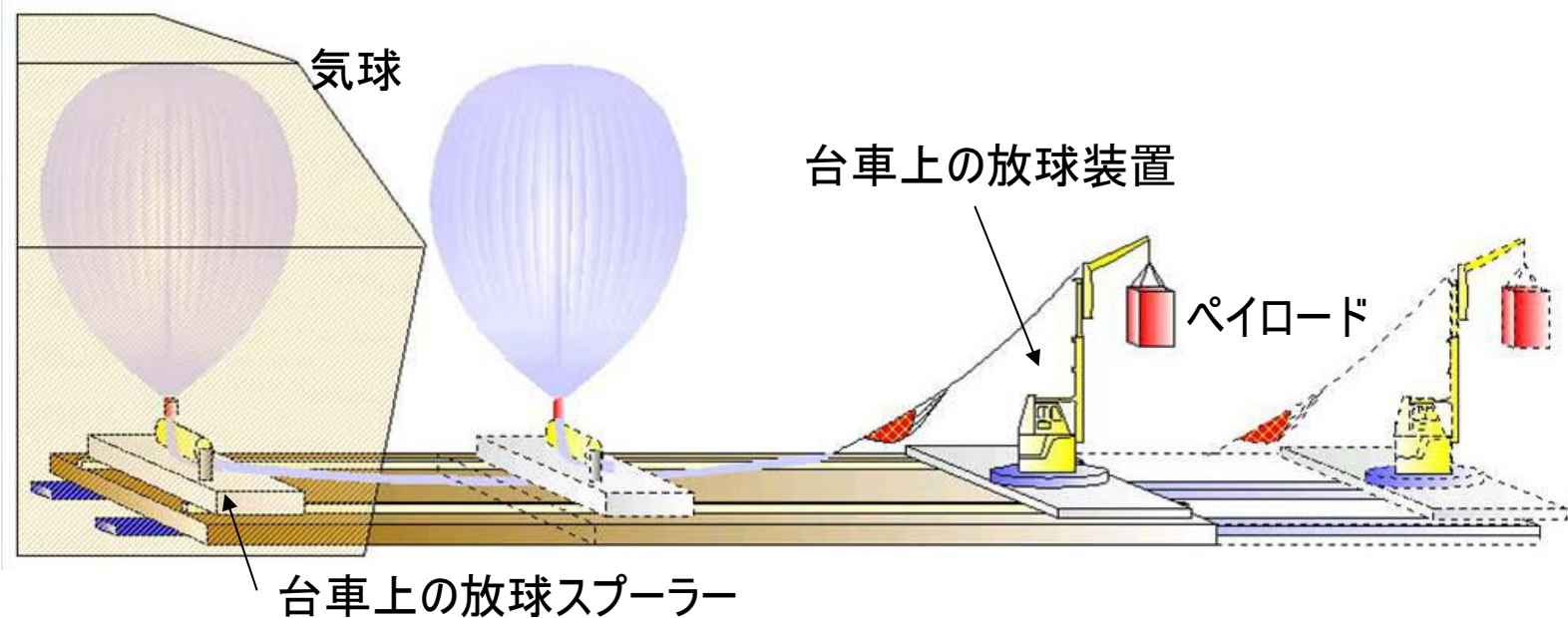
大樹町航空公園

- 成層圏プラットフォーム (SPF) プロジェクト (~2004)
- SPFのために整備された大型ハンガーとハンドリングエリアを有効活用



スライダー放球装置の開発

- ヘリウムガス注入中の突風
 - 気球損傷の最大要因
 - 気球大型化によりガス注入時間が延びる
- 屋内でのガス注入
 - ガス注入完了後に気球を建物から引き出して放球



観測所移転後の国内実験(目標)

- ペイロード重量 最大 2,000 kg (バラスト含む)
- 気球サイズ 満膨張体積最大 1,000,000 m³ (B1000)
- 到達高度 ~58 km (ペイロード重量 < 10 kg、BVT300)
40~42 km (ペイロード重量 < 1,500 kg、B1000)
- テレメトリ 64 kbps PCM + 白黒ITV 1系統
→ 200 kbps PCM
- コマンド ディスクリートコマンド 9 ch
→ 2,400 bps シリアルコマンド
- 回収 太平洋上での船舶による回収
→ パラfoilによる降下誘導制御
→ 十勝平野での陸上回収

まとめにかえて

□ 気球実験

- 気球開発にはまず実験ありき
- 実験で使われ科学的成果を生むことができて初めて開発が完了

□ 新しい仕様の要求を歓迎

- プライオリティを考慮しながら大気球観測センターで開発
- 開発されたものが他の実験の底上げ
- ただし、まず現状を理解していただきたい

□ 科学的意義の大きい実験を実施し続けられなければ気球は廃れてしまう

- JAXAの外に対しても、中に対しても
- ぜひ宇宙線分野の飛翔体実験の強化を!