

# 高高度気球からの自由落下カプセルを用いた 第一回微小重力実験

稲 富 裕 光<sup>1</sup>, 神 保 至<sup>2</sup>, 石 川 毅 彦<sup>1</sup>, 橋 本 樹 明<sup>1</sup>, 澤 井 秀 次 郎<sup>1</sup>,  
齊 藤 芳 隆<sup>1</sup>, 吉 光 徹 雄<sup>1</sup>, 坂 井 真 一 郎<sup>1</sup>, 小 林 弘 明<sup>3</sup>, 藤 田 和 央<sup>3</sup>,  
坂 東 信 尚<sup>1</sup>, 後 藤 雅 享<sup>4</sup>, 山 川 宏<sup>1</sup>

## First microgravity experiment using free-fall capsule released from high altitude balloon

By

Yuko INATOMI<sup>1</sup>, Itaru JIMBO<sup>2</sup>, Takehiko ISHIKAWA<sup>1</sup>, Tatsuaki HASHIMOTO<sup>1</sup>,  
Shujiro SAWAI<sup>1</sup>, Yoshitaka SAITO<sup>1</sup>, Tetsuo YOSHIMITSU<sup>1</sup>, Shin-ichiro SAKAI<sup>1</sup>,  
Hiroaki KOBAYASHI<sup>3</sup>, Kazuhisa FUJITA<sup>3</sup>, Nobutaka BANDO<sup>1</sup>, Masayuki GOTO<sup>4</sup>,  
and Hiroshi YAMAKAWA<sup>1</sup>

**Abstract** : The first microgravity experiment using a new free-fall capsule released from 40km altitude was performed on May, 2006 based on a drag-free technique. The fundamental data for analyzing the drag-free control, the flight sequence, and the wireless communication between the capsule and a control room were successfully obtained in the first test flight.

**Key words** : free-fall capsule, drag-free control, high altitude balloon, first test flight

### 概 要

ドラッグフリー技術に基づいた新しい自由落下カプセルを、2006年5月に高高度気球 B200 を用いて高度40km から投下し、微小重力実験が行われた。今回の最初の試験飛行により、三陸大気球観測所の制御室とカプセルとの間での無線通信、ドラッグフリー制御、そして飛行シーケンスを分析するための基本的データを得ることに成功した。

### 1. 緒 言

今日、様々な微小重力実験用のシステムがある (図1)。落下塔は $10^{-4}G$  程度の良好な微小重力環境が得られるけれども、その持続時間は数秒である。飛行機での放物線飛行は約20秒間の微小重力環境の持続時間を実現させる反面、微小重力レベルは落下塔ほどには良くない。そして、観測ロケット、人工衛星、スペースシャトル、国際宇宙ステーションは長時間の微小重力を達成することができるが、それらは発射時に過重力環境を経るため

---

<sup>1</sup> Institute of Space and Aeronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency

<sup>2</sup> Department of Materials Science, School of Engineering, Tokai University

<sup>3</sup> Institute of Aerospace Technology, Japan Aerospace Exploration Agency

<sup>4</sup> Space Environment Utilization Center, Japan Aerospace Exploration Agency

に、ある種の微小重力実験にとっては支障となる。

高高度からの自由落下による微小重力実験用システム自体は過去に存在した。旧宇宙科学研究所（ISAS）は1978年から気球落下実験システムを開発し、1983年には32kmの高度から落下したシステムにより $2.9 \times 10^{-3} \text{G}$ の環境を10秒間達成した [1]。しかし、その当時の落下システムはドラッグをキャンセルする機能を組み込まなかったため、微小重力環境レベルとその持続時間が制限された。ドイツのMIKROBAもまた気球からの落下システムである [2]。それは1990年に55秒の自由落下時間で $10^{-3} \text{G}$ の微小重力レベルを提供することができたが、この重力レベルは航空機実験と同程度であり、より高品質の微小重力環境が望まれていた。

真空中での自由落下の場合、落下体の速度は自由落下時間に比例して増加する。例えば、34秒以上でその速度は超音速になり、1分間程度では音速の2倍程度まで加速される。一方、大気中での落下の場合は空気抵抗（ドラッグ）はその速さの二乗および空気密度にほぼ比例する。従って、空気が濃い低高度で落下させればドラッグが大きいため、微小重力環境を得るためには空気が薄い高高度からの落下が必要となる。しかし、高高度からの単純な自由落下だけでは落下時間の延長と共に空気密度が高くなり微小重力レベルが悪くなっていく。

そこで著者らは、40km以上の高々度まで上昇出来る気球から自由落下カプセルを投下することで高品質の微小重力環境を少なくとも30秒以上持続する実験システムを提案している [3, 4]。本提案実験システムの大きな特徴の1つとして、高品質の微小重力環境を長時間維持するためのさらに進んだ制御技術として二重の殻構造を使ったドラッグフリー制御技術を導入することが挙げられる。この実験システムは、以下の特徴により落下塔施設と観測ロケットとの間の技術的なギャップを埋めることが期待される。(1) 実験までの短い準備期間と搭載試料への簡便なアクセス、(2) 1Gからの自由落下による20秒を超える微小重力状態、そして(3) 落下実験システム全体の回収と再使用。

本論文では、高高度気球 B200を用いた高度40kmからのドラッグフリー落下カプセルの第一回試験飛行とその実験システムを用いた微小重力実験の結果を述べる。

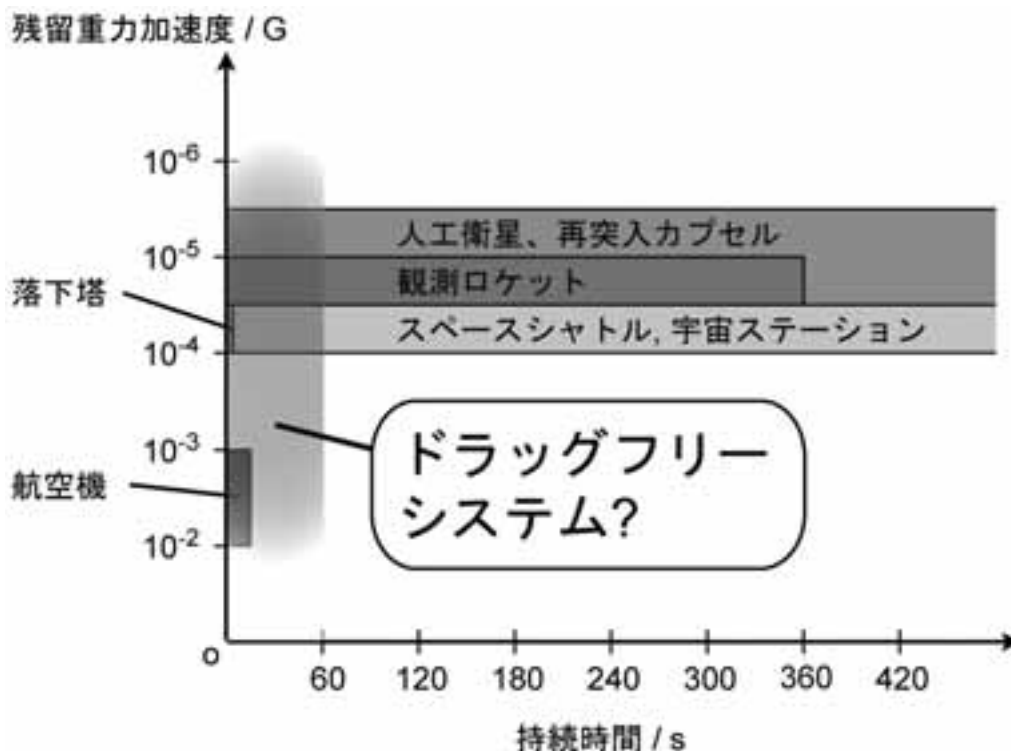


図1 様々な微小重力実験用システムの比較.

## 2. ドラッグフリー制御の原理

図2は、ドラッグフリー制御の原理である。本実験システムは、外カプセル（落下カプセル本体自体）、内カプセル（微小重力実験モジュール）、そして推進系から構成される。外カプセルの内側には空洞があり、内カプセルが収納される。そして、外カプセルと内カプセルとの相対位置を測定する3次元位置センサーが同じく空洞内に配置され、落下中に内カプセルを同じ相対位置で浮遊させるよう外カプセルが追従する。この方法により内カプセルはほぼ外乱なしで地球の重力だけに引かれて落下するので、理想的な微小重力環境を達成することが出来る。

実際の飛行では、全長約6mの外カプセルが高々度気球から切り離されると、4つのレーザー変位計の出力データをもとに3軸制御用の50N級コールドガスジェット16基を用いて大気のドラッグがリアルタイムで相殺される。

## 3. 開発経緯

大気中での自由落下を利用して30秒以上の微小重力環境を実現させるためには、落下体は推進系と姿勢制御機構を持たなければならない。そして出来るだけドラッグを減らすために、数100kgの搭載機器とともに40km以上で浮揚することができる高高度の気球を開発する必要がある。

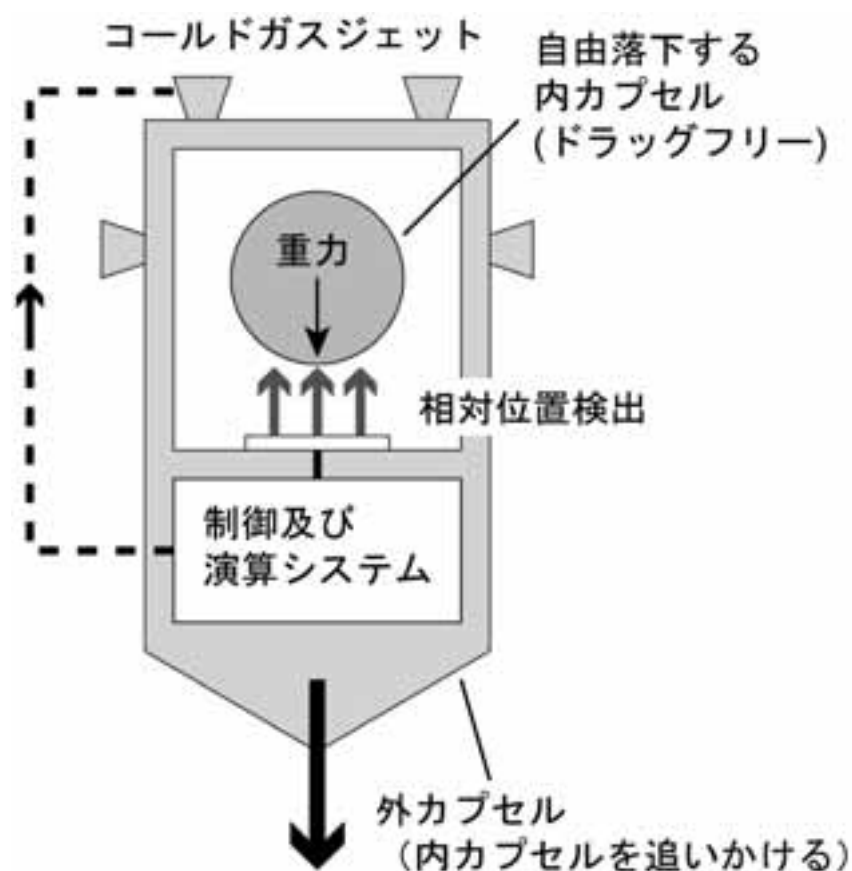


図2 ドラッグフリー制御技術に基づいた自由落下カプセルの模式図。

ISAS そして JAXA は高高度の気球を開発してきており、2002年に53kmの高度の世界最高記録を達成し [5]、そしてより重い搭載機器をより高い高度まで上げることが出来るように改良を続けている。現在は300kg級ペイロードでさえ40km以上へ飛行させることが出来る。このように高い高度で飛行させるためには気球は十分に軽くする必要があり極端な薄膜によって作られる一方、気球の搭載機器が重い時は地上からの打上げ時に気球のフィルムの強度が要求される。この問題に対処するために、応力が集中する気球の最上部に多層フィルムが使われ、そして、その方法は三陸大気球観測所で2004年秋にテストに成功した。

ドラッグフリーシステムの基本的なデザインは2004年に考えられた。具体的には、気球からの落下カプセルの投下高度、外カプセルの機械的設計、熱と電力の制約を含む搭載機器の設計、ガスジェット・スラスタの開発、そしてCFDと風洞実験の両方を用いた外カプセルの空力性能のトレードオフ、が検討された。図3は、完成後の外カプセル1号機の写真を示す。外カプセルは落下中の空気抵抗を減らすために先端が滑らかなロケットに似た形状を持たせた。先端コーン部はGFRP製であり、ここに通信アンテナを格納した。そして、機体前方の与圧ブロック機体主要部はCFRP製とし、落下カプセルの回収に必要なパラシュートは機体後端に搭載された。カプセル全体の軽量化のために、主要な機能部品はアルミハニカムパネル上に搭載した。機体の外壁は海上での回収の際の視認性を良くするために黄色に塗装した。

内カプセル (MOUSE : Microgravity Operation Unit for Scientific Experiments) は外径約30cmの球体で、北半球部は赤外線およびRF送受信のために透明アクリル製の、南半球部はレーザー変位計による相対位置測定のためにステンレス製の、の2つの半球殻で覆われた。その内部は微小重力実験用の幾つかの小さい部品から構成された。図4、5に内カプセルのブロックダイヤグラムと製作した装置の写真を、表1にそのデータ収集・処理系の



図3 第一回試験飛行カプセルの写真。

概要を示す。

内カプセルが外カプセルと物理的に絶縁されるので、取得した画像や加速度データのようなテレメトリデータの送信，また実験制御のコマンド送信は無線を介して実施されなければならない。また内カプセルを外カプセル内の空洞に組み込んだ後に天候不順などの理由で一時的に放球が延びた場合を想定して，内カプセルを外カプセルに組み込んだ後はスタンバイモードとなり消費電力を極めて低くするようにした。

#### 4. 第一回飛行試験の概要

本飛行は，(1) 最上部で多層フィルムを使う新開発気球B-200の飛行試験，(2) 長距離通信，ドラッグフリー制御系とそれらに関連する搭載機器のシステム機能試験，(3) 高高度での熱的条件の収集，そして(4) 打ち上げから海上の回収に至る運用試験，を目的とした。それらの試験のためには数秒間の自由落下で十分であり，ドラッグは十分小さい為にガスジェットだけで補償できるとした。図6に，第1回飛行試験のシーケンスを示す。

本飛行では搭載機器のシステム機能試験の一環として，内カプセル内で短時間ながら微小重力実験を実施した。その内容は，異なった表面張力を有する二液相の混合状態における大粒径気泡の変形と移動に関する予備実験であった。

融体を含む反応では目的の物質が精製される際にスラグなどの副生成物が生じ，それに微細な生成ガスの気泡が付着するが，重力場ではこれらの気泡が一方向に浮揚し系外に排出される。一方，微小重力下では条件さえ許

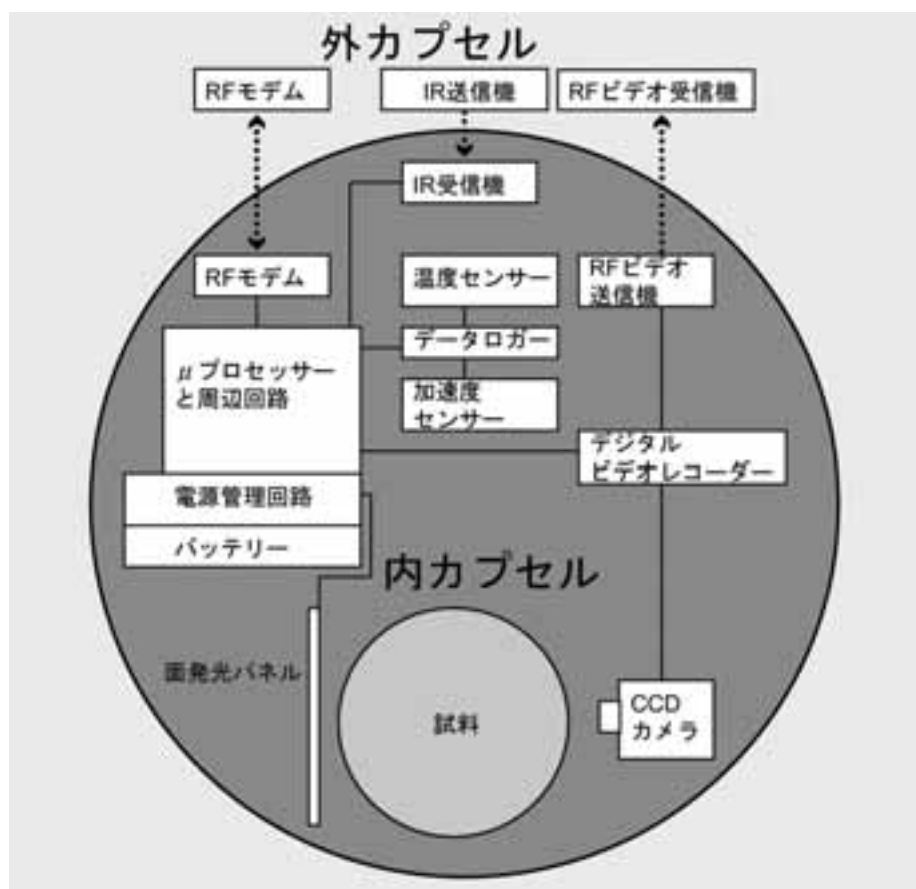


図4 MOUSE #1のブロックダイヤグラム。

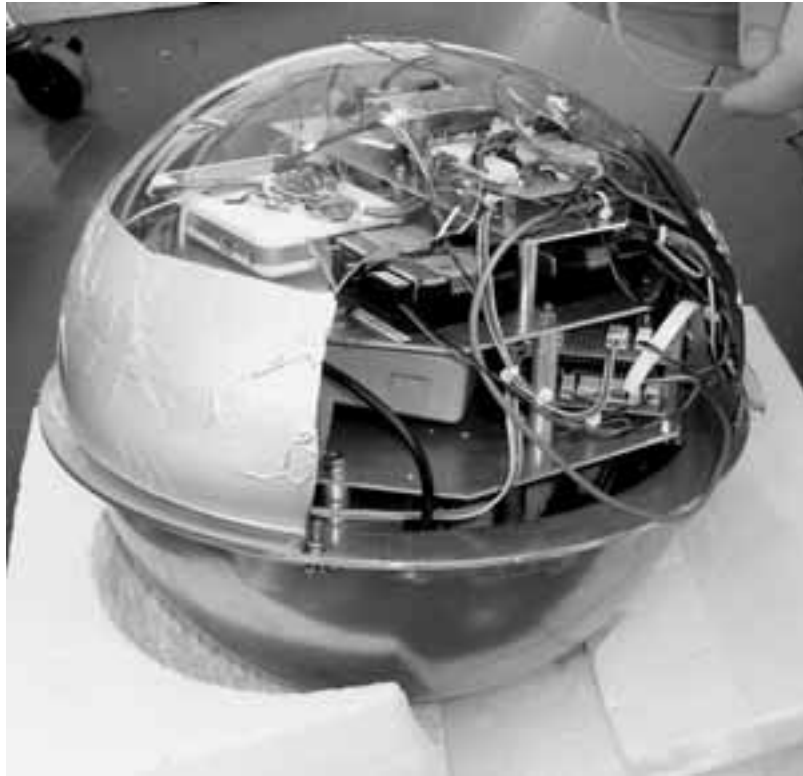


図5 MOUSE # 1 の写真.

表1 MOUSE # 1 のデータ収集・処理, テレメトリ, コマンド制御の仕様.

コマンド	スタンバイモード解除 (赤外線受信)
	実験開始 (RF モデム)
	実験停止 (RF モデム)
テレメトリ	加速度, 温度 (RF モデム)
	画像 (RF 送信)
計測データの保存	画像 (512MB CF カード) : 1 ch, 30fps
	加速度 (32MB CF カード) : 3 ch, 2 kHz sps
	温度 (小型データロガー) : 1 ch, 1 spm
シーケンサー	8-bit マイクロプロセッサ 4 個
電源	リチウム電池 (9V 1.2Ah) 7 個

せば発生気泡は大粒径気泡に成長して融体の中で停滞する。神保らはこのような気泡の停滞を改善し、これを捕集・除去するという課題に取り組んできた [6]。図7は異なる表面張力を持つ二液相中の気泡の移動の模式図であり、液体Aの表面張力が液体Bよりも大きい場合を想定している。この図のように気泡が界面において表面張力の小さい液体側に引っ張られ、最終的にはその内部に閉じ込められることが予想される。これまで、微小重力下の二液混合状態について表面エネルギーの大きな液相中の気泡が表面張力のより小さい液相側に自発的に移動吸収される現象を観察しており、吸収時間が吸収する相の粘性および気泡径に比例することが見出されているが、これはあくまで数 mm 程度の小さい気泡についての場合であった。一方、大粒径気泡の界面変形や界面エネルギー減少を伴う自発的な異相間の移動吸収についてはほとんど手付かずの状態である。気泡の自発的な異相

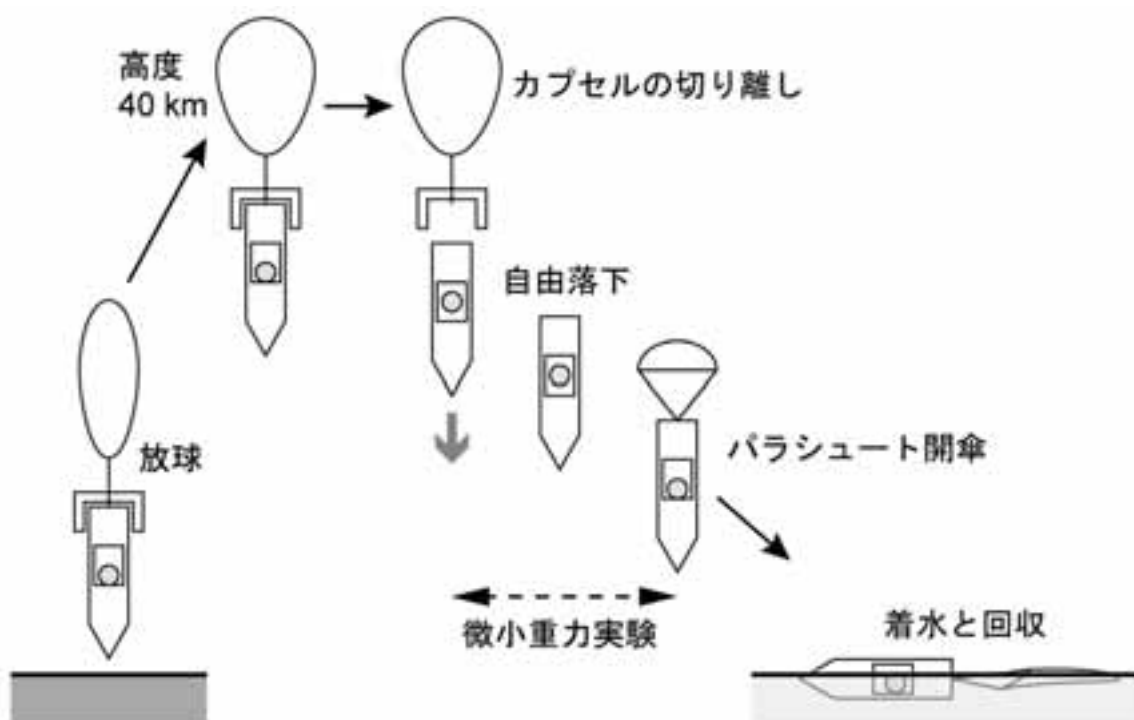


図6 第一回試験飛行シーケンス。

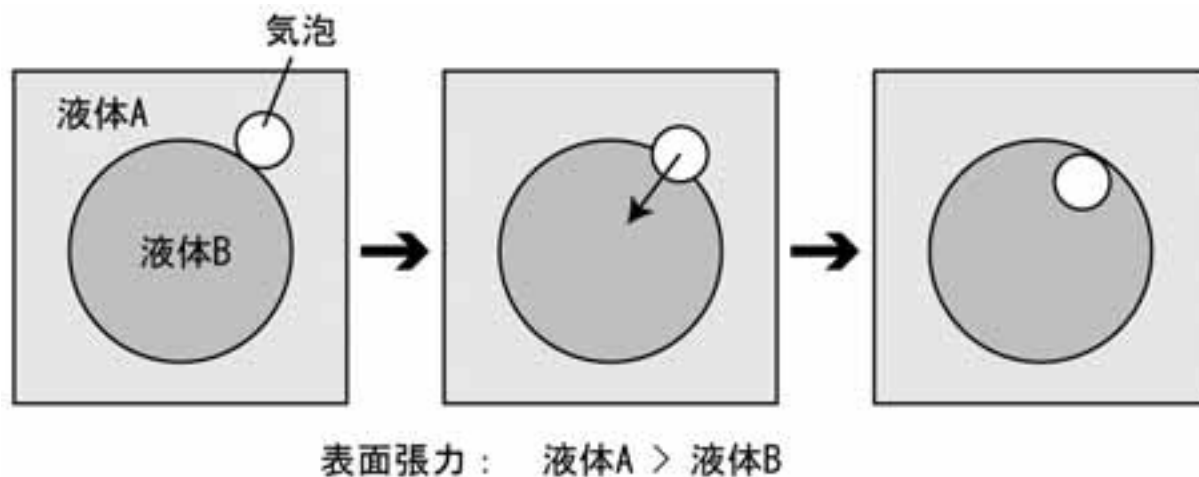


図7 異なる表面張力を持つ二液相中の気泡の移動の模式図。

間の移動吸収についての基本的な考え方は、小気泡の場合はほぼ剛体球の移動として近似した界面エネルギー減少を駆動力とした変化と考えられ、また大粒径ではある程度の界面変形を伴うとしても同様な自発的な移動吸収をもたらすものと推測される。

そこで本実験ではフロリナートー水系の透明な二液混合状態での大粒径気泡の挙動を、微小重力環境にて小型 CCD カメラにより撮影・記録した。

## 5. 飛行試験の結果

2005年夏の打ち上げリハーサルにより運用手順の確認および構成要素の一部見直しを行い、本ドラッグフリー

システムの最初の飛行試験が2006年5月27日に JAXA 三陸大気球観測所にて行われた。気球を放球し所定落下地点へ落下カプセルが移動した後に、赤外線通信により外カプセルを介して地上局からスタンバイモードを解除し、搭載回路の電源 ON および RF 送信機によるテレメトリデータ送信を開始した。続いて、外カプセルを介したクイックルック・データ送信と並行して、画像や高速サンプリングレートの実験データは内カプセル内の大容量記憶装置に記録され、それらは実験終了・回収後に PC に転送された。

本落下システムは落下時 X から20秒後に自動的にパラシュートを開傘し、減速しながら三陸沖に着水した。機体は CFRP で軽量化しておりまた水密構造としたことによりそれ自体で海上に浮遊することが出来、船上支援作業によりヘリコプターで吊り上げて再び三陸大気球観測所まで回収した。そして回収後に機体の構造及び搭載機器の機能は概ね健全であることが確認され、予定通り 2 号機にその主要な構成品を再使用することとなった。

飛行試験の結果、約 7 秒間の微小重力環境が得られ、その後に内カプセルは外カプセル壁への衝突を繰り返した。自由落下中の内カプセル内の残留重力データの解析結果を図 8 に示す。内カプセルの内容積の制限上、小型軽量でかつ高精度の 3 軸加速度センサー（SILICON DESIGNS 社製、モデル 2440-002）をその中に組み込んだ。宇宙ステーションの微小重力環境計測では、DC 成分を正確に求めるのは困難なので通常は AC 成分に注目する。図 8 のデータで明らかのように、大雑把に見て X 軸、Y 軸、Z 軸はそれぞれ  $-3.5 \times 10^{-3}G$ 、 $-7.4 \times 10^{-3}G$ 、 $1.4 \times 10^{-3}G$  近傍で推移していた。内カプセル内部には試料液体の動きを除き稼動部が無いので、計測され得る残留重力の DC 成分は主として (1) 内カプセルの自転による遠心力、(2) 加速度センサー出力のオフセット、(3) 内蔵データロガーの A/D 変換時のオフセット、によるものであろう。そして AC 成分の振幅は各軸でそれぞれ  $6 \times 10^{-4}G$ 、 $1 \times 10^{-3}G$ 、 $1 \times 10^{-3}G$  程度であり、そのレベルは宇宙ステーションでの環境と比べて遜色ない。この AC

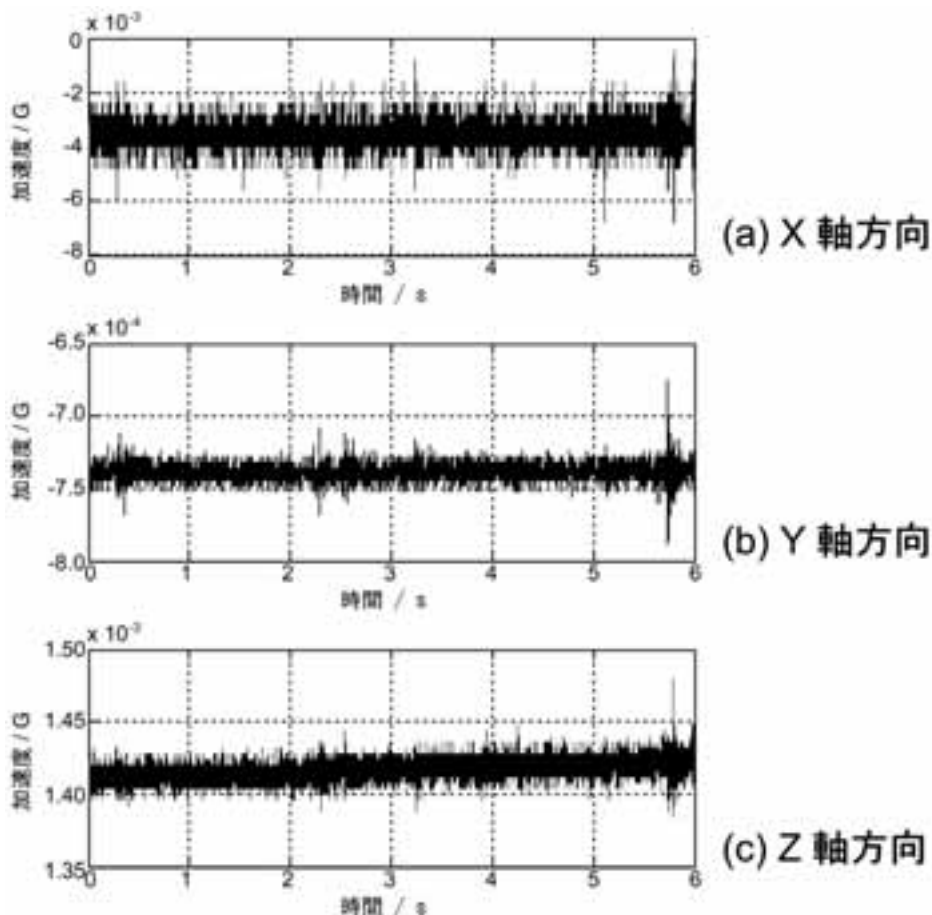


図 8 自由落下中の MOUSE # 1 における残留重力加速度の測定値。



成分は主に（１）試料液体の動き，（２）データロガーの A/D 変換時（14bit）の量子化誤差やノイズ，そして（３）外カプセル・内カプセル間の空気の移動に伴うごく僅かな圧力変動，などが発生源として考えられる。

図 9 に落下時の試料容器中の液体および空気の移動に関する画像を示す。試料容器は外径 6 cm のアクリル製球殻で，図中上部から順に空気，赤色に着色した水，そしてフロリナート FC72 であった。室温でのフロリナートおよび水の表面張力はそれぞれ約 0.012 N/m，0.073 N/m であり両者の差が大きく，かつ安全性が高いので試料流体として適していた。

1 G から自由落下状態に移行すると，水およびフロリナートが試料容器壁に沿って画面上方に移動したが，その後容器内側の表面全体が液体で覆われて気泡がそれらに内包される状態になるまでには至らなかった。本微小重力実験上での問題点として，１）高高度環境での長時間飛行により内カプセル周りの空間が減圧され，その結果当初封入していた液体が若干漏れ出して試料容器上部の空気の体積が増加した，２）気泡と接触していた試料容器の内壁の一部がフロリナートで濡れてしまったために壁面上での水の濡れ広がり方が悪くなった，ことが挙げられる。現在，得られた画像をもとに気泡と液体の動きを解析中である。

今回の飛行試験は短時間のドラッグフリー落下ではあったが，全システムの機能確認と運用の試験，そして新型気球の飛行試験が行われ，次回以降の落下実験に必要なデータが取得された。また微小重力実験の観点から，（１）実験試料の内カプセルへの組み込みから外カプセルへの搭載，そして気球の放球に至る手順の再検討，（２）落下時の内カプセル周囲の気圧・温度制御の高度化，など本システムでの今後解決すべき課題の抽出が出来たので，本試験は十分その目的を果たしたと言える。

## 6. 解決すべき課題と今後の予定

本落下実験システムをより広く微小重力実験に供する為には，内カプセル周囲の温度・圧力制御，試料のレートアクセス・アーリーリターン，そして内カプセルの大型化を解決すべきである。また，以下に記すようにドラッグフリー制御の利点を生かすべく姿勢制御の精密化，推力の増強が必要である。

表 2 に本システムの開発と今後の飛行の計画概要を示す。１号機のように低速落下の範囲では空気抵抗による外乱は小さいために，ガスジェット・スラストによる制御は効果がある。しかし，自由落下の持続期間がより長くなるにつれ，姿勢安定化のための空力的な力を生み出す可動翼が必要である。２号機以降は，４つの可動翼を付加して姿勢を制御する。

落下中の動圧が大きくなると外カプセルは多くの推力を必要とする一方，吸気エンジン（ABE）はその推力が動圧にほぼ比例する性質があるので，ABE の搭載は自由落下カプセルにとって有利である。３号機では ABE を使って微小重力環境のより長い持続期間（50 秒）を示す予定なので [7, 8]，他の飛行とは構成が異なっている。それは二重殻のドラッグフリー構造が使われず，加速度計測と単純な微小重力環境実験装置が搭載されるであろう。ABE の有効性が実証されれば，将来的には微小重力実験時間の更なる延長を実現し，実験終了後に回収点付近まで飛行することも期待される。４号機の飛行は 2008 年を予定しており，そこでは 30 秒～40 秒間微小重力環境実験が実施される予定である。

## 7. 結 論

高高度気球を用いたドラッグフリーカプセルシステムが微小重力実験のために新たに開発され，最初の飛行試験が 2006 年 5 月に実施された。そして，システム全体の機能・運用に関して，次回以降の落下実験に必要なデータが取得され，微小重力実験に関しては以下の結果を得た。（１）約 7 秒間ではあるが良質な微小重力環境が得られた。（２）内カプセルでの実験シーケンスの正常実施および搭載機器の健全性が確認された。（３）異なった

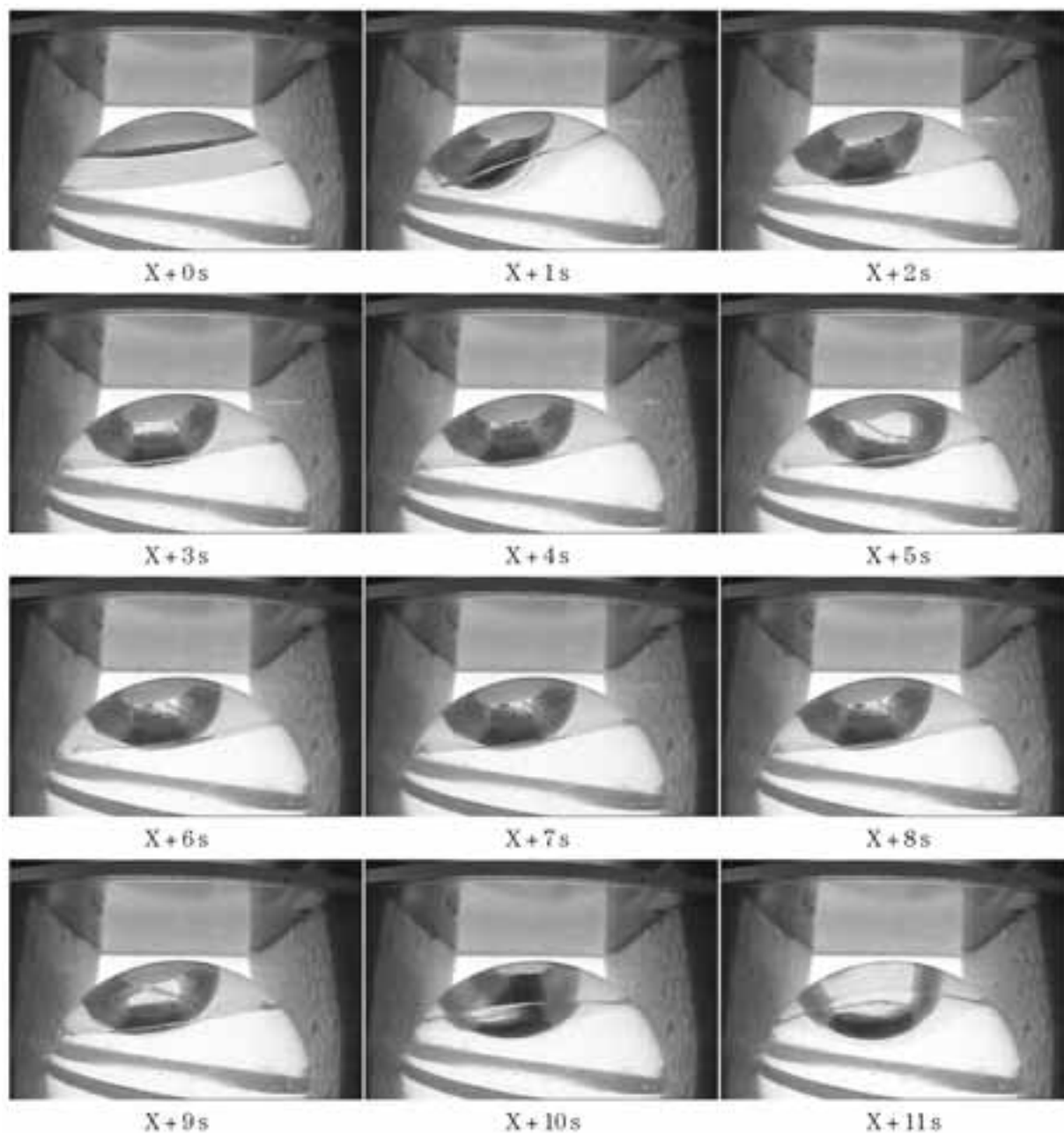


図9 異なる表面張力を持つ二液相中の大気泡の移動.

表面張力を有する二液相の混合状態における大粒径気泡の変形と移動に関する画像を得ることに成功した.

## 謝 辞

本研究は、文部科学省科学研究補助費 学術創成研究費「高高度気球を用いた微小重力実験装置の開発」(16GS0220, 2004)の助成を受けて行われた.

表2 今後の開発および飛行スケジュール。

号機	飛行時期	飛行内容
1	2006年5月 (実施済み)	・高高度の気球による飛行及び回収の運用実証 ・スラスター制御のみによるドラッグフリー制御および搭載機器の動作検証 ・流体物理実験
2	2007年春	・基本制御 ・動翼と超音速パラシュートの動作確認を含む微小重力実験の実証 ・約30秒間の燃焼科学実験
3	2007年夏	・ABEの微小重力実験への適応性の確認
4	2008年	・基本制御 ・30～40秒間の微小重力実験(内容は未定)

注) ここで基本制御とは、スラスターおよび動翼の併用によるドラッグフリー制御を指す。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] M. Namiki, S. Ohta, T. Yamagami, Y. Koma, H. Akiyama, H. Hirose, J. Nishimura: “ Microgravity experiment system utilizing a balloon” , *Advances in Space Research* 5, 83, 1985.
- [ 2 ] T. Hashimoto, Y. Saito, Y. Inatomi, T. Ishikawa, S. Sawai, H. Yamakawa, T. Yoshimitsu, S. Sakai: ” Micro-gravity test system using free-fall capsule from high altitude balloon”, *J. Jpn. Soc. Microgravity Appl.* 21, S66, 2004.
- [ 3 ] T. Hashimoto, S. Sawai, Y. Saito, Y. Inatomi, T. Ishikawa, T. Yoshimitsu, S. Sakai, H. Kobayashi, K. Fujita, N. Bando, and H. Yamakawa: “MICRO-GRAVITY TEST SYSTEM USING FREE-FALL CAPSULE FROM HIGH ALTITUDE BALLOON” , *Proc. ISTS-2006*, h-04, Kanazawa, Japan, June, 2006.
- [ 4 ] V. A. Thomas, N. S. Prasad, C. A. M. Reddy: “ Microgravity research platforms-A study: CURRENT SCIENCE”, *CURRENT SCIENCE* 79, 10, 2000.
- [ 5 ] T. Yamagami, Y. Saito, Y. Matsuzaka, M. Namiki, M. Toriumi, R. Yokota, H. Hirose, K. Matsushima: “ Development of the highest altitude balloon” , *Advances in Space Research* 33, 1653, 2004.
- [ 6 ] K. Kudo, K. Date and I. Jimbo: “ Gas Bubble Removal with Suspended Droplets under Microgravity” , *Proc. 16th ESA Symp. on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research*, Sankt Gallen, Switzerland, 91, 2003.
- [ 7 ] T. Sato, H. Taguchi, H. Kobayashi, T. Kojima: “ Development study of Mach 6 Turbojet Engine with Air-Precooling” , *J. British Interplanetary Society* 58, 231, 2005.
- [ 8 ] K. Fujita, S. Sawai, H. Kobayashi, N. Tsuboi, H. Taguchi, T. Kojima, K. Okai, T. Sato and K. Miyaji: “ Precooled Turbojet Engine Flight Experiment Using Balloon-Based Operation Vehicle” , *Acta Astronautica* 59, 263, 2006.