

# 人工衛星落とす「落火生」

高知工科大学工学部電子・光システム工学科

森永隆稔、川隅慎司、埜口和弥、和泉好則、山岡勝、近藤裕士

## 1. 背景

流星とは、太陽の周りを公転する微小天体が、地球大気内に突入し発光したものである。その高さは150 kmから100 km程度の高さで光り始め、80 kmから50 kmの高さで消滅する。流星の元になる小天体は、0.1 mm以下のごく小さな塵のようなものから数cm以上ある小石のようなものまで様々な大きさがある。こうした天体が地球の大気に秒速数十kmという猛スピードで突入し、上層大気の子と衝突してプラズマ化しガスが発光する。

流星の観測方法には写真観測、電波観測、ビデオ観測などがあり、様々な場所で観測が行われている。しかし、流星がいつどこで発生するかわからないために、写真やビデオでは観測できる確率が低い。そこで、人工的に流星を発生させることができれば、ある程度の時間と場所に必ず流星が来るということが予測できるので、観測が容易になる。尚且つ、同じ流星をターゲットに観測するというので、多地点での同時観測ができ、観測データの比較ができるために、総合的な解析が可能となる。そして地球に向けて発射する物体の形や物質を変えることにより、反応過程の変化が観測できることが期待でき、流星の成分の解明に繋がる。また、流星の大気圏突入時の様子を衛星から撮影できれば、大気による吸収の影響を受けずに、紫外領域での分光データが蓄積できる。

## 2. 目的

衛星から地球に向けて物体を発射し、流星を人工的に発生させる。発射する物体は、形状や物質を変えて、反応過程の変化を観測する。また、衛星から大気圏突入時の様子を撮影することによ

り、これまでなかった宇宙からの人工流星の観測を行う。そして、観測データによる総合的解析で自然の流星物質成分ならびに大気成分との反応過程の解明を目的とする。また、地球帰還カプセルの設計に重要なデータを得る。

## 3. ミッション概要

物体を発射させる方法には、弾丸発射、ブロック発射、カプセル発射の3つがあり、それぞれ違った構造になっている。弾丸発射装置は弾の装填が可能で弾を多く発射できる。そして、発射する物質を変えることにより、大気圏突入時の反応過程の変化が観測できる。ブロック発射装置では、大きい物体を落とすので、比較的大規模な流星を発生させることができ、燃え尽きるまでの様子が長く観測できる。また、振動や衝撃に対して脆い物体はコーティングを施すことにより発射可能となる。カプセル発射装置ではカプセル自体に送信機を搭載し、地球に落ちていく過程の温度を測定し、衛星に向けてデータを送信する。

全ての発射が終わると、衛星上面に搭載されたブースターを噴射し、衛星自体を地球に向けて落とす。そして、衛星が落ちていく過程を、カメラが壊れるまで撮影し続け、大気圏突入による姿勢擾乱等を一定値以上検出したら、メモリを載せた回収用ロケットのブースターを噴射し、衛星本体から分離させる。そして自らも人工流星となり地球に向けて突入する。噴射終了後エンジン部分を分離させ、その後パラシュートが開き、地球にデータを持ち帰る。衛星は大気圏突入により最後の大流星となりその使命を全うする。

#### 4. システム

図1に人工衛星外観図を示す。この衛星は幅500mm、奥行き500mm、高さ500mm、総重量約100kgで小型三軸制御衛星のカテゴリに属し、打ち上げ後にソーラーパネルを開くようになっている。

図2に搭載機器概略図を、図3に搭載機器配置図（前面、側面）を、図4に機器系統図を、表1に搭載機器一覧を示す。発射装置は側面4方向と底面に搭載されており、上面にはブースターとカメラとサンセンサが、底面には観測用カメラが搭載されている。

物体を発射させる方法は3つあり、球形の弾丸をガス圧で飛ばす方法、立方体のブロックをバネで発射させる方法、スピンにより落下方向を制御したカプセルをバネで発射させる方法がある。全ての物体を発射し終わると、衛星上部に搭載されたブースターを噴射し、衛星ごと地球に落とす。そして、大気圏突入時の画像を撮影して、大気圏突入による姿勢擾乱や温度上昇を一定値以上検出したら、メモリを搭載した回収用ロケットを発射させ、データを地球に持ち帰る。

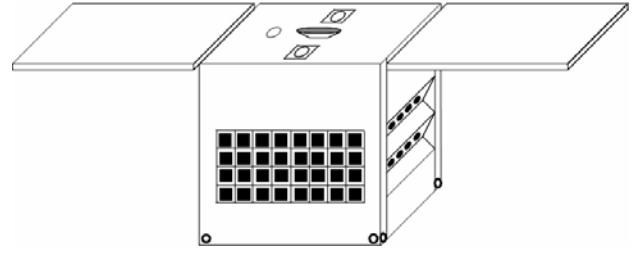


図1：人工衛星外観図

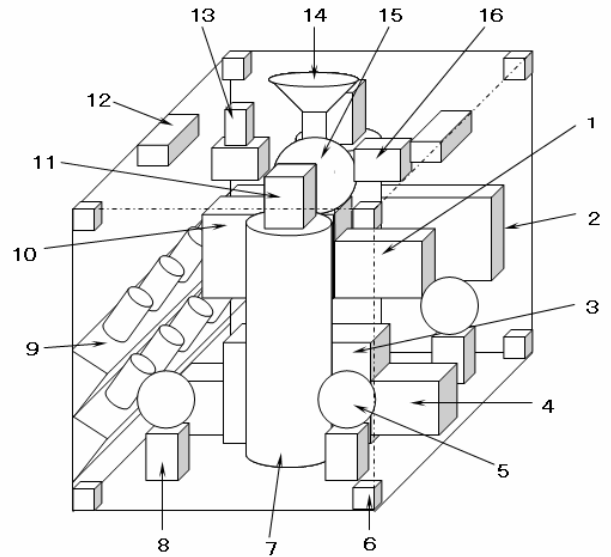


図2：搭載機器概略図

表1：搭載機器一覧

番号	機器名	数
1	リアクションホイール	1
2	ブロック発射装置	2
3	弾丸発射装置	1
4	通信装置	2
5	スラスタ用タンク	4
6	スラスタ	8
7	回収用ロケット	2
8	下部カメラ	4
9	カプセル発射装置	2
10	コントローラ(CPU)	1
11	上部カメラ	2
12	熱制御装置	2
13	サンセンサ	1
14	ブースター	1
15	ブースター用タンク	1
16	バッテリー	2

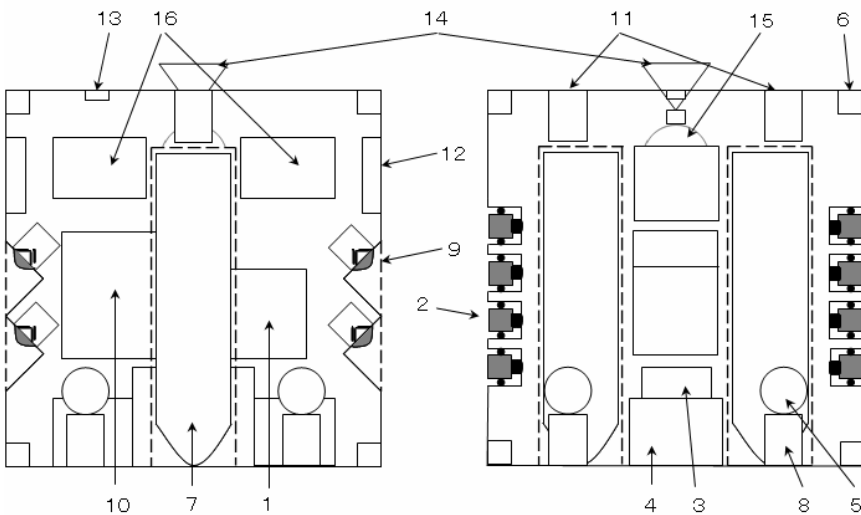


図3：搭載機器配置図（左：前面、右：側面）

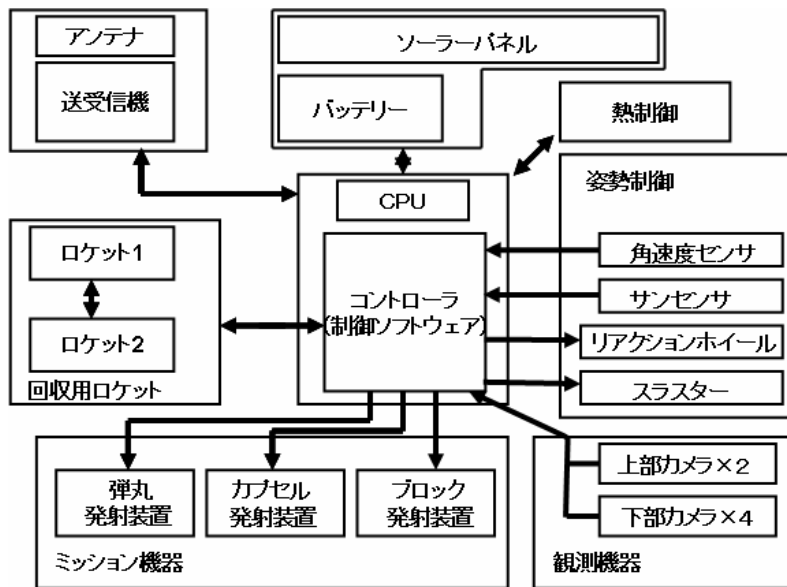


図4：機器系統図

#### 4. 1 弾丸発射装置

図5に弾丸発射装置の内部構造を、図6に衛星の底面図を、図7に弾丸発射機構を示す。弾丸は小さい弾（6mm径）と大きい弾（20mm径）の球体を用意する。衛星底面に小さい弾用の発射口を、同時発射を狙って4つ並列に設置し、大きい弾用の発射口は中心軸に1つ設置する。この装置は装填式になっており、何発も発射できるようになっている。弾を入れるマガジンは、小さい弾用は各30発で4本分あり、計120発、大きい弾用は5発入るようになっておく。動力は液体アルゴンを少量気化させたのち、ただちにバルブを開きガスの噴射の圧力で弾を発射させる。

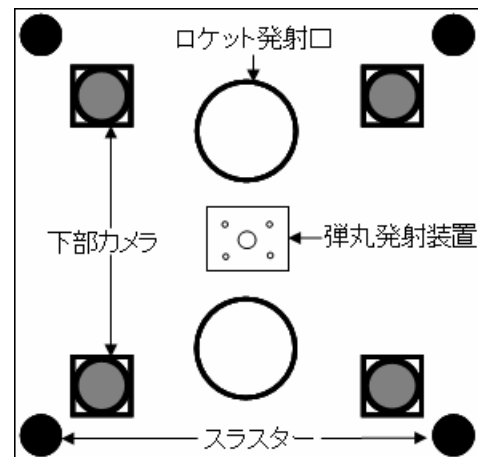


図6：衛星の底面図

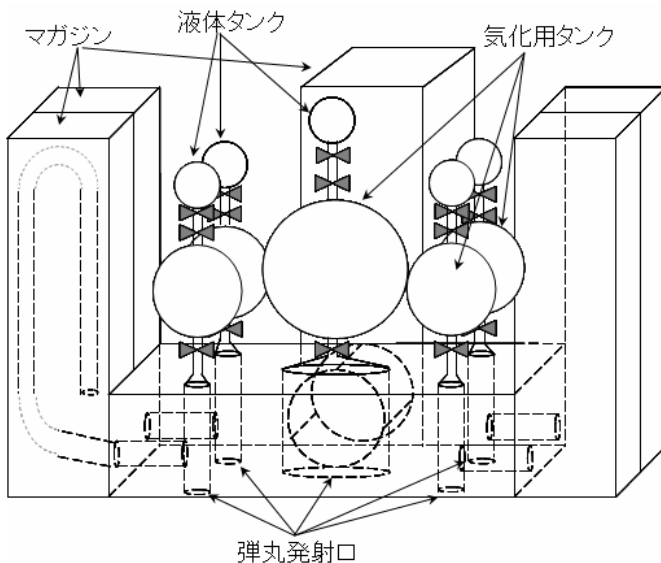


図5：弾丸発射装置の内部構造

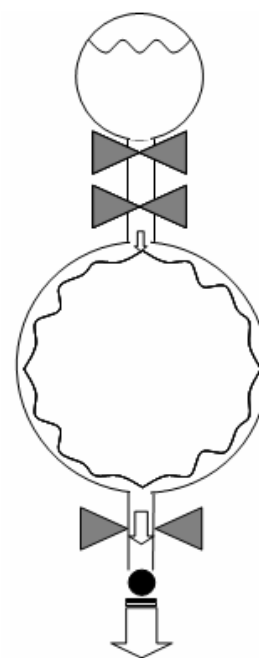


図7：弾丸発射機構

#### 4. 2 ブロック発射装置

図8にブロック発射装置の内部構造を示す。各ブロックは30×30×30mmの立方体で、前面および背面に備え付ける。発射方式にはバネによる反動を用い、コントローラの指令によりワイヤカッターが作動し、ストッパーが切れてブロックが発射される。各ブロックは片面に縦4列、横8列で32個、2面合わせて64個搭載する。

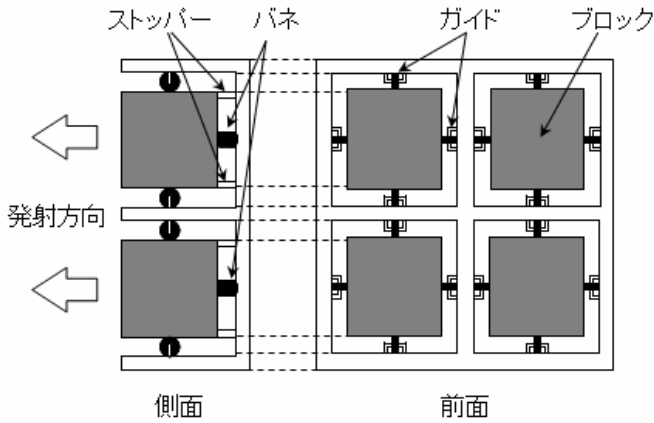


図8：ブロック発射装置の内部構造

#### 4. 3 カプセル発射装置

図9にカプセル発射装置の内部構造を示す。カプセルは最大径50mm×全長55mmで、ブロックと同様にバネで発射されるが、ガイドによりスピンをかけ発射する。カプセルはスピン安定により、耐熱構造の面を地球側に向けた状態で、安定に落下でき、内部に微小機器の搭載が可能である。カプセルの大気圏突入時の温度計測データを衛星本体に送信することにより、様々な条件でデータを取得できる。

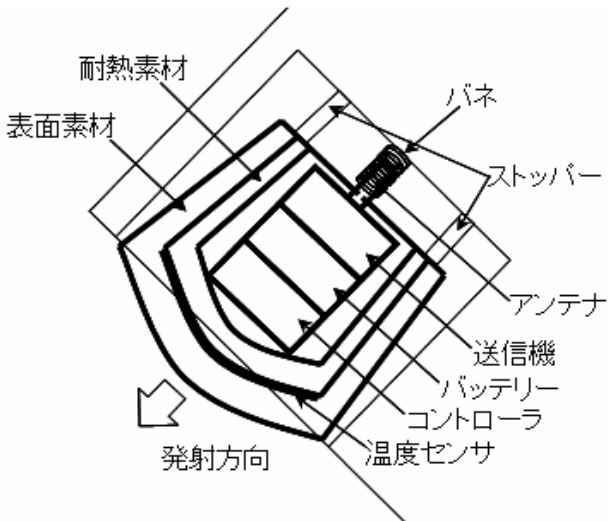


図9：カプセル発射装置の内部構造

#### 4. 4 回収用ロケット

図10に回収用ロケットの内部構造図を、図11にロケット発射の概念図を示す。ロケットは直径100mm×全長400mmで、衛星に2機搭載されている。衛星が地球に向けて落ちていく過程で、大気圏突入による姿勢擾乱や温度上昇を一定値以上検出したら、ロケットのブースターを噴射して衛星から発射される。離脱後、ブースター部を分離し、電子密度プローブを展開して耐熱素材の蒸散によるプラズマの生成を測定する。成層圏に到達後連続してパラシュートを開き地球に帰還する。落下過程における、通信障害について定量的に調べるため、ロケット同士で通信状況をチェックする。

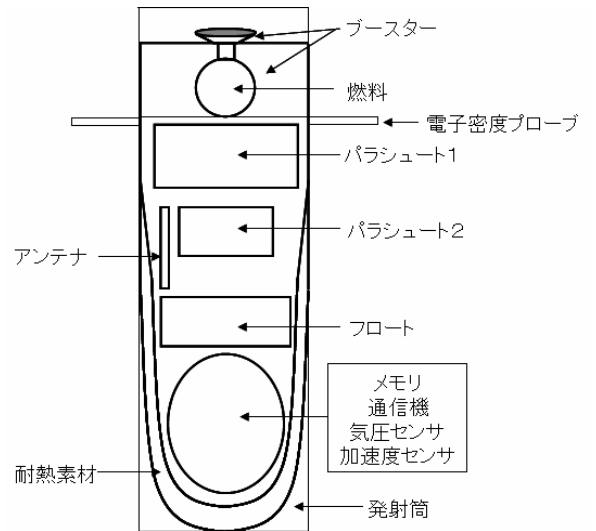


図10：回収用ロケットの内部構造

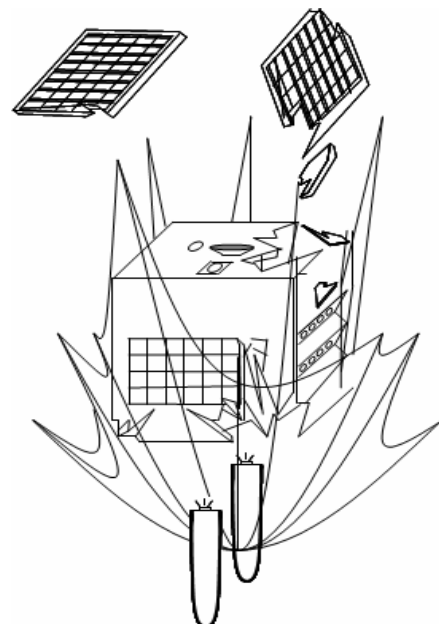


図11：回収用ロケット発射概念図

## 5. 運用計画

本衛星は、日本上空の夜側を近地点とし、近地点高度上空300km、速度10km/s、遠地点高度は約71,000km、速度1.4km/s、周期約24時間の長楕円軌道に投入する。長楕円軌道上の適切な位置で流星体を放出し、流星体の軌道を衛星軌道に対し微小変更をすることで、近地点付近の上空150km以下を通るように流星体を地球大気に突入させる。人工衛星から放出された様々な形状、および物質による人工流星体は大気の影響を受けて減速され、近地点の上空150～100kmで流星となると予測させる。

発射装置の生み出す相対速度は高々50m/s程度なので、物質が流星となる時の速度は、近地点での人工衛星の速度とはほぼ同等である。なお、バネ発射は5m/s、ガス圧発射は50m/sと仮定すると放出のタイミングはそれぞれ近地点通過の約50分および約8時間前となる。人工流星の発光過程は、地上および衛星本体からの同時観測により総合的に調査する。

### 5. 1 発光量予測

2006年1月15日に帰還したNASA StarDust 探査機の大気圏突入カプセルは直径80cm、重量が45.8kg、速度12.8km/sで、その時の光度は-7等星であった。この結果から推測すると、発射する一番小さな物体として直径6mm、重量2.5gの球を仮定すると、速度10km/sで突入させる場合、約3万分の1のエネルギーとなる。エネルギーが100分の1で光度が5等星分下がる。よって、この物体は4等星程度の光となり、人間が見ることができる光度は6等星までなので、十分視認可能な光度だと考えられる。但し、明瞭なスペクトル観測にはもう少し大きいサイズの流星体が望ましい。

### 5. 2 地上実験・観測

流星の軌道、発光高度、スペクトル、微小破碎過程を知るため地上では多地点観測を行う。

カメラでは紫外～可視～赤外領域での撮像、な

らびに分光観測を行いスペクトル情報から反応過程における存在物質を解析する。さらに待ち受け観測の利点を活かし高速度・高分解能撮影を行い、破碎過程におけるダイナミックな変化を詳細に記録する。

また、音波計測により、流星飛翔に伴う衝撃波による可聴下音(infrasound)および可聴音(audible sound)の観測を行う。アマチュア無線を利用した流星電波観測(HRO)による組織的な観測も合わせて実施する。

一方、流星現象の際の超高層大気の影響を詳細に捕らえるため、既存の各種レーダーおよびライダーの上空に人工流星を発生させ、流星通過時の超高層大気の温度、風速、電子密度などの変化の様子を観測するようなアクティブな大気観測の提案もできる。流星物質周辺のプラズマの様子や衝撃波発生条件についての情報を同時に得る。

### 5. 3 宇宙実験・観測

人工流星の大気圏突入時の様子を、人工衛星搭載のカメラ(X線～紫外～可視～赤外領域)での撮像、ならびに分光観測を行う。特にX線および紫外領域の観測は地球大気の影響を受けない宇宙からの観測では重要である。弾丸やブロックで形状や物質の違いおよび粗密の違いによる流星発光過程の違いを観測する。カプセルでは、大気圏突入時の温度変化を測定する。

衛星本体の大気圏突入時は衛星搭載カメラで崩壊直前の様子を撮影する。回収用ロケットでは、気圧と加速度の変化や電子密度変動を計測する。また大気圏突入時のロケット同士での近距離通信状態を計測する。

### 5. 4 実験の運用手順

- 1) 日本上空を近地点とする長楕円軌道にのせる。太陽電池の発電効率が確保でき、なおかつ観測地である日本上空を縦断する効率的な軌道をとる(図12)。

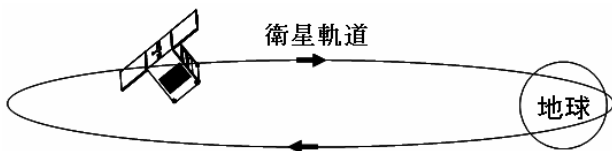


図 1 2 : 衛星軌道

- 2) 物体発射テストを行う。目標地点に物体を正確に落下させるため、人工衛星から物体を幾つか連続発射し、物体発射タイミングや角度を調整する。
- 3) 観測地(主に高知県)の上空で人工流星が通過するように物体を発射する。(図 1 3)。

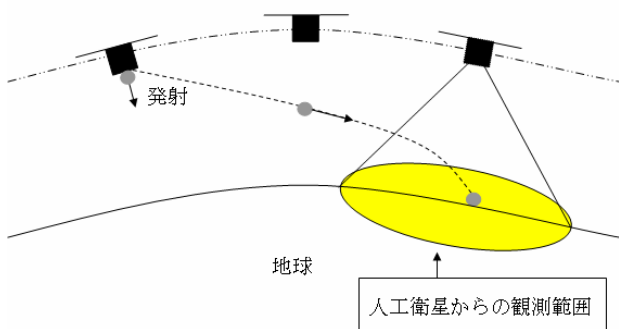


図 1 3 : 物体発射図

- 4) 地上(多地点)と衛星から同時観測をする。物体の発射方法によっては、三軸制御により、発射時には衛星の姿勢を一時的に変更する。
- 5) 宇宙で撮影した画像やデータを分割して地上に送信する(図 1 4)。

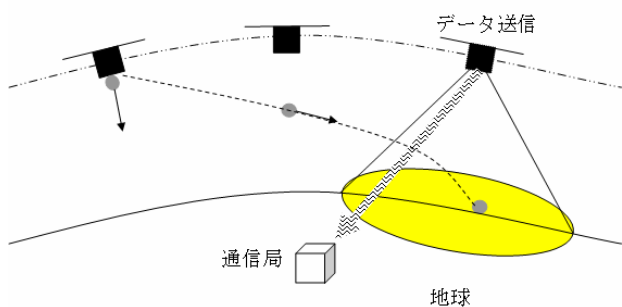


図 1 4 : データ送信図

(全て発射し終わるまで 3、4、5 を繰り返す、また、物体発射により重量が少しずつ減っていくため、場合により軌道修正も行う)

- 6) 全ての物体を発射し終わると、衛星上面のブースターを噴射し衛星本体を落下させる。

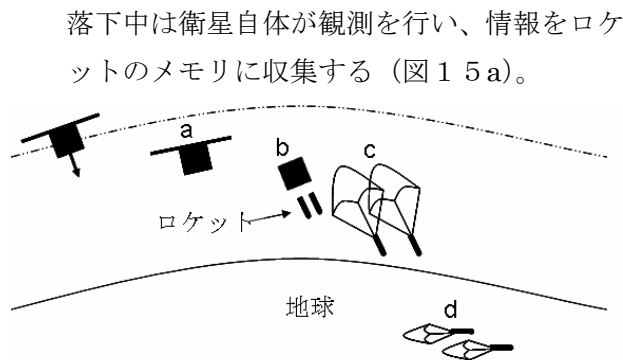


図 1 5 : ロケット帰還図

- 7) 大気圏突入による姿勢擾乱等を一定値以上検出したら、ロケットのエンジンを噴射し、衛星本体から発射させる(図 1 5 b)。
- 8) ブースター噴射終了後エンジン部分を分離する。一定の高度に達すると一段目のパラシュートを開く。速度がある程度落ちてきたら二段目のパラシュートを開く(図 1 5 c)。
- 9) 落下地点を砂漠、又は海上を目標として落とす。海上では一定時間フロートにより海水面に保持される(図 1 5 d)。
- 10) カプセルからのビーコン波を頼りに飛行機、ヘリコプター、船舶を使用して回収する。
- 11) 回収した情報を分析し、地球で観測した情報と比較する。

## 6. 発射する物質

表 2 に発射する物質の一覧を示す。表中の 1 が弾丸、2 がブロック、3 がカプセルを意味し、○印を付けた物を用意する。◎印は大小両方の弾丸を用意する。振動や衝撃に対して脆い物質はコーティングを施す。ブロックの場合は多孔質構造の物体も用意して、微細構造による発光過程の違いを実験する。一般に、流星スペクトルには、Fe, Mg, Ca, Na, Si などの金属原子がよく見られるために、その原子を含む金属を使用すると、比較データとして重要なものが取得できる。

表 2 : 発射する物質一覧

物質名	含まれる元素	1	2	3
金	Au	○		
プラチナ	Pt	○		
銀	Ag	○		

銅	Cu	○	○	
鉄	Fe	◎	○	
アルミニウム	Al	◎	○	
マグネシウム	Mg	◎	○	
ダイヤモンド	C	○	○	
水晶	Si,O		○	
硫黄	S		○	
鉛	Pb	○	○	
ゲルマニウム	Ge	○	○	
スズ	Sn	○	○	
ニッケル	Ni	○	○	
耐熱物質	C		○	○
チタン	Ti	○	○	○
シリコン	Si	◎	○	
塩	Na,Cl		○	
流紋岩	Si,O,K,Mg,Fe,Al, H,F,Ca,Na,等		○	
安山岩	Si,O,Ca,Mg,Fe,Al, Na,K,N,B,Sr,Ti,等		○	
玄武岩	Si,O,Al,Ca,Na, Fe,MgMn,Ti,Ni K,N,B,Ba,Sr,等		○	
花崗岩	Si,O,Ca,Na,Al,K,B a,N,Sr,Fe,F,Mg 等		○	
閃緑岩	Si,O,Ca,Na,K Al,Ba,N,Sr,B Fe,Mg,Ti,H,等		○	
斑レイ岩	Si,O,Ca,Mg,Fe,Al H,Ti,Na,等		○	
カンラン岩	Si,O,Mg,Fe,Mn Ti,Ni,等		○	
石灰岩	CaC,O,等		○	
チャート	Si,O,Fe,S,等		○	
大理石	Ca,C,O,等		○	
真珠	Ca,C,O,Na,K,Mn Mg,Fe,Al,等	○		
天然ゴム	C,H		○	
砂糖	C,H,O		○	
パラフィン	C,H		○	

土佐カツオ節	(動物性有機物)		○	
落花生	(植物性有機物)		○	

## 7. 観測データの解析

衛星搭載カメラまたは地上観測からは人工流星の撮像または分光データが得られ、成分解析としては分光データのスペクトル解析を行う。自然流星は単一物質ではないため、成分解析を行うための理想的条件ではなく、その組成および混合比により分光データの解釈が困難な場合も多い。さらに地球大気成分との反応の結果生じる成分による寄与との区別も非常に難しい。しかし、本実験では既知の形状の単一物質を発射できるため、分光解析結果からは単一物質の固有スペクトル成分が得られ、かつ撮像結果からは構造の違いによる破碎状況の比較も可能である。そして、自然の流星の既存観測データとの比較において、本人工流星実験による結果は非常に重要な指標を与える事ができ、結果として流星物質成分の解明につながる。さらに、単一物質による人工流星の発光をスペクトル解析することにより、流星本体による発光と大気成分による発光を明瞭に区別するための重要なデータが得られると期待される。これらの解析において、電波、音波、レーダー、ライダーなどによる総合的観測は分光観測で得られない領域の知見を補う。これら理想的観測条件の下で最後に実施予定の地球上の岩石や有機物などを流星体とした実験には非常に興味のある所である。

## 8. 現状の問題点

ポギーバック衛星の一般的な制御である50cm角に本衛星の機能すべてを収納する事は難しい。例えば、スラスターの噴射剤タンクの大きさである。物体を発射する度に人工衛星の軌道修正を行う必要があり、多くの噴射剤が必要となるかもしれない。その場合は人工衛星を大きくする必要もある。また50cm角に収める必要があった場合はロケットを一機減らすなど発射物体を減らす。ロケットを1機しか搭載しない場合は、

超高層大気でのロケット間の通信実験が実現出来ない。

打ち上げ時の衝撃や振動が原因で人工衛星に搭載している発射物体が人工衛星本体から外れたり、コーティングを施した脆い物質が粉碎したりする可能性がある。そのため事前に入念な実験が必要である。

## 9、得られる成果

単体の物質を人工流星にすることにより、光のスペクトルの比較から、自然に発生する流星の成分の解明に繋がる。スペクトル解析により物質による反応過程の解明に繋がるため、流星群によって、含まれる物質に違いがあるのかという、母天体の状況や原始太陽系形成時の理解に重要な観測の実現が期待される。また、流星が大気圏に突入する時、可聴下～可聴域の音が発生するかどうか、およびその大気伝搬の様子を実験的に検証できる。そして、地上と宇宙空間からの観測結果を比較することにより、流星現象の総合的な解析が可能になる。

真空装置やコンピュータシミュレーション等の大気圏突入のシミュレータでは得られない直接計測により大気圏突入時の温度変化、物質の微細構造による反応過程の違いを知ることができ、スペースシャトルなどの地球に帰還する飛翔体の構造設計などに反映させるデータ取得が期待させる。回収用ロケットは人工衛星の大気圏突入による姿勢擾乱や温度上昇を一定値以上検出したら、ロケットのブースターを噴射して衛星から発射される。この発射技術は緊急脱出カプセルなどに応用可能である。

衛星打ち上げ時の衝撃に耐えるために岩石、有機物に施すコーティングは前例の無いことである。よってこの実験はコーティング技術の発展に繋がると考えられる。

この人工衛星は、人工的に流星を発生させるので、中々燃え尽きずに発光を続ける流星も発生させることができると期待され、「流星が流れている間に願い事を3回言うと願いが叶う」という子

供達の夢を実現できる。現実になんかことで願いは叶わないが、子供達は願いを叶えるために努力を始めるであろう。この実験を大々的に宣伝すれば、次世代を担う子供達に宇宙への興味を持たせ、未来の宇宙開発に関わる人材を育成できる。また、流星が予測した通り、見える範囲で発光するかどうかという、実験的要素の面白さや「わくわく感」を幅広い年齢の人達に伝えることができる。

## 10、まとめ

衛星から地球に向けて物体を発射することにより、人工的な流星を発生させ、発光の様子を観察する。同一条件下での多種類の単体物質発射実験は、単体物質の反応過程を明確なものにすることができる。よって流星の成分解明という点においては画期的な実験と考えられる。

本実験は、元々落とす目的で衛星を打ち上げるという前代未聞のチャレンジとなる。この実験により流星についての未知なる部分の解明、宇宙空間での物体の発射技術の確立など、これからの宇宙開発に役立つ技術を得られると考えられる。

夢、それは誰もが生まれながらにして持っているものである。いつか実現したい。そんな想いに火を灯したい。叶えたい。

その想いを載せて、「落火生」は今、旅立つ。

## 参考文献

- ・ 衛星設計入門、衛星設計コンテスト実行委員会監修、茂原正道・鳥山芳夫 共編、培風館、2002
- ・ 第13回衛星設計コンテスト最終審査会、発表作品説明資料、衛星設計コンテスト事務局、2005
- ・ 石のはなし、白水晴雄著、技法堂出版、1992
- ・ 宝石のはなし、白水晴雄・青木義和 共著、技法堂出版、1989
- ・ NASA  
([http://reentry.arc.nasa.gov/conditionsstar\\_dust.html](http://reentry.arc.nasa.gov/conditionsstar_dust.html))