

第7章 次世代小型ロケット実験システムの検討

有人宇宙システム株式会社 柴藤羊二、黒田信介

はじめに

宇宙実験における宇宙環境利用について小型ロケット及びスペースシャトルを中心にこれまでの経緯と成果の概要を紹介し、日本が実施してきた小型ロケットによる宇宙実験の全容について詳説する。さらに商業化を目指す垂直離着陸再使用ロケットシステム(NexLs: Next-generation Launch Service)の概要を紹介する。

1. 宇宙実験用小型ロケットの開発の経緯

1970年代になると、我が国の材料科学者の中で、宇宙船内の微少重力状態を利用した新しい材料精製法に関する関心が高まってきた。これは、アポロ計画に始まった人間の宇宙活動による一連の実験がスカイラブ計画の中で材料精製実験の成果が商業ベースとしての宇宙産業へ将来発展する可能性を示したからであった。

宇宙空間は、地上とは異なる微少重力、超高真空度など特殊な条件下にあり、これらの条件を利用することによって地上では得がたい材料の製造など、材料科学および技術分野において数多くの有意義な実験を行える。このような宇宙空間を利用した材料実験の成果は将来、材料技術を大きく変革すると考えられ、さらに商業化も期待された。

科学技術庁は、1974年(昭和49年)から1976年(昭和51年)まで宇宙空間を利用した材料実験に関する調査を実施し、それに引き続いて1977年(昭和52年)から1979年(昭和54年)まで宇宙空間での材料実験のための地上実験装置の試作研究および地上実験が行われた。

1974年(昭和49年度)に科学技術庁から委託された財団法人未来工学研究所の調査ではスペースシャトル利用計画への参加候補テーマ82件中11件が材料科学に関するテーマ件数であったが、1975年に同じく科学技術庁から委託された財団法人工業開発研究所の「材料分野におけるスペースシャトルの利用に関する調査」では87件と増加した。以上の調査によってまとめられた提案はスペースシャトルの利用という前提条件があった。しかし、我が国がこのような実験をすべてスペースシャトルに依存することには問題があることが指摘されていた。すなわち、「新材料を開発する研究」とか「実験成果を実用にする際、即時性のある研究」は我が国の工業所有権に関係して、産業に重要な影響を及ぼすものである。スペースシャトルによる実験は、当然、NASAによる審査が行われる。このような重要な研究が外国期間の審査を経なければ実行できない状態をつくり出すことは大きな問題となることが考えられた。

米国では、1980年以後のスペースシャトルによる実験までは、地上試験やロケットによる短時間微少重量実験を積み重ねてきており、スペースシャトルによる実験の準備を進めていた。ヨーロッパはESAが中心になって米国のスペースシャトルに搭載する宇宙実験室の製作を進めており、同時に、宇宙実験を行う搭乗員の訓練も本格的に行っていた。当時、西ドイツは米国の小型ロケ

ットを利用して材料実験を行い、さらに予備的な実験に英国の小型ロケットを利用する計画も進めていた。

以上のように、材料科学者の要望とその重要性および諸外国の動向を考慮して、宇宙材料実験を我が国の小型ロケットで実行することを考える必要があった。微小重力空間を確保する手段としては、1)高い塔からの落下、2)航空機の放物線飛行時に生じる微小重力環境の利用、3)気球からの落下、4)小型ロケットによる打ち上げ、6)人工衛星などの利用等がある。これらの中で宇宙開発事業団として支援できる小型ロケットについて検討が進められた。

NASAは1974年に最初のロケット材料精製実験テーマの公募を広く内外に行い、BLACK BRANT VC ロケットを用いて1975年11月の第一回打ち上げ実験以来、ロケットによる実験を継続していた。また、英国のSKY-LARKもBLACK BRANT VCとほぼ同程度の性能を持っていた。我が国もこれらの機種に対応できるロケットとして、TT-500ロケットがありそれを材料実験用ロケットに改良することで計画が検討された。1980年から1983年までTT-500Aロケットで材料実験が実施され、1991年から1998年まで打ち上げ能力が向上されたTR-1Aロケットで様々な宇宙実験が実施され、大きな成果が得られた。これらの成果はFMPTやこれからの宇宙ステーションでの初期利用に向けた宇宙実験の高度化、共通実験装置の要素技術など当面の技術開発目的を達成した。

TT-500Aロケットによる宇宙実験は、6回の打ち上げで19の実験がなされた。6回のうち、2回目と3回目は回収には失敗したが、改良を加え、その後、連続して成功した。これらの実験により、非常に興味のある結果が得られたと同時に、各種実験装置の設計・開発のための多くのデータが蓄積され、1992年(平成4年)に毛利宇宙飛行士がスペースシャトルに搭乗して行った、第一次材料実験などの開発に利用された。また、TT-500Aロケットの打ち上げ結果で得られた微小重力環境は、非常に質が高いものであることが証明された。これは、スペースシャトルや宇宙ステーションのような有人システムでは得られない環境によるものであった。TT-500Aロケットは、宇宙での材料試作実験用電気炉のほか、イメージ炉、超音波攪拌炉などを使ったさまざまな予備実験が行われ、多くの有効なデータが得られている。TT-500Aロケットは、宇宙実験の有効性を実証しただけでなく、その成果はスペースシャトルによるFMPTや国際微小重力実験室での実験を成功させるために大きな貢献を果たした。また、ロケット技術はそのまま、大型化された宇宙実験用のTR-1Aロケットに引き継がれた。

さらに、このロケットによりわが国がそれまでに保有していなかった、宇宙からの再突入技術と回収技術を手に入れた意義は大きなものである。当時、再突入技術は、米国においても公開されておらず、宇宙開発事業団は航空宇宙技術研究所の協力を得て、国内技術だけで手探りで開発したものである。

現在国際スペースステーションの建設がすすめられているが、種々の要因で大幅に遅延している。このため宇宙実験の機会がなくなっている。また、ステーションに搭載して実験するにはコストがかかりすぎること、および、ステーションで実験する前の予備的な小規模実験の必要性、他国に実験の内容を知らせたくなく、前もってわが国だけで実験をしておきたいことなど、小型ロケ

ットによる実験の要望が再度大きくなって来ている。ここで、これまでのロケットによる実験の経緯について述べると同時に、これからどのように展開する必要があるのか考察してみる。

2. TT-500Aロケットの開発

2.1 ロケットによる宇宙実験

宇宙開発事業団は、1976年(昭和51年)に科学技術庁の依頼を受けて、TT-500ロケットを用いた材料実験の可能性について検討した。その結果、TT-500ロケットを改修することによって、各研究機関で研究を進めている材料実験を支援可能であるとの結論に達し、1977年(昭和52年)から開発に着手し、1980年(昭和55年)からTT-500Aロケットによる材料実験が行われた。

ロケットによる宇宙実験は、米国のスペースシャトルや宇宙ステーションでの実験を行う前段階の予備的な実験や実験装置の開発に利用されるだけでなく、実験時間の短いものであればロケットのみの実験でも、かなりの成果が期待できる。[1]

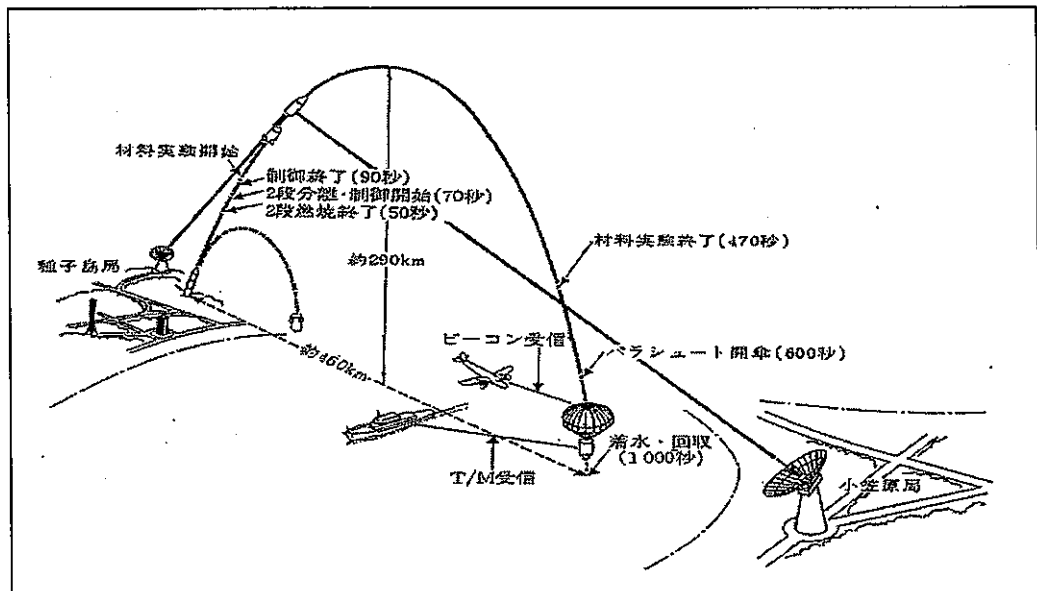


図-1 飛行及び回収概要

ロケットによる実験は、図-1 に示されるように、地球の大気圏を出て、放物線を描いて慣性飛行をして、大気圏に再突入するまでの約6分間の微小重力状態を利用して行われる。宇宙実験終了後にロケットの宇宙実験部は大気圏に再突入し、空気による減速を受けた後にパラシュートを開傘して、さらに減速させて海上に軟着水させる。着水後、浮袋が作動して海上を浮遊しているところを航空機と船舶を使って回収される。ロケットによる宇宙実験は、米国および欧州でも実施されていたが、米国では1975年(昭和50年)から1986年(昭和61年)まで多くの実験を行っている。欧州でも1977年(昭和52年)から現在まで連続して利用されている。

わが国では、1980年(昭和55年)から1983年(昭和58年)までTT-500Aロケットにより、6回の微小重力実験が実施され、1991年(平成3年)からは大型化したTR-1Aロケットによる実験が再開されていて、現在までに7回の飛行実験が行われている。

ロケット以外の微小重力実験の手段として、数10mまたは数100mの塔から実験装置を落下させ、着地までの数秒間、数kmの高度まで実験装置をバルーンで持ち上げて落下させ、空気抵抗の少ない間の10秒間、航空機に実験装置を搭載して、放物線を描いて飛行させる10~20秒間、などの実験が可能である。これらの実験は比較的簡便で実験費用も少なく済むが、実験時間の短いこと、微小重力レベルの質が悪いことなどがあり、本格的な実験を行うにはやはりロケット実験が必要となる。

2.2 TT-500Aロケットの概要

TT-500Aロケットは、宇宙開発事業団がN-1ロケットの打ち上げの前に、レーダやテレメトリなどによるロケットの追跡機能を確認するために、打ち上げていたTT-500ロケットを改良して、追跡機能試験を行うと同時に、宇宙実験の実施および実験部の洋上での回収を可能にしたものである。TT-500ロケットは、JCRロケットを利用したものであり、無重量実験を行うまでに7機が追跡機能確認のために飛行していた。このため無重量実験用に改良されたTT-500Aロケットとしての初飛行は、8号機からである。[1]

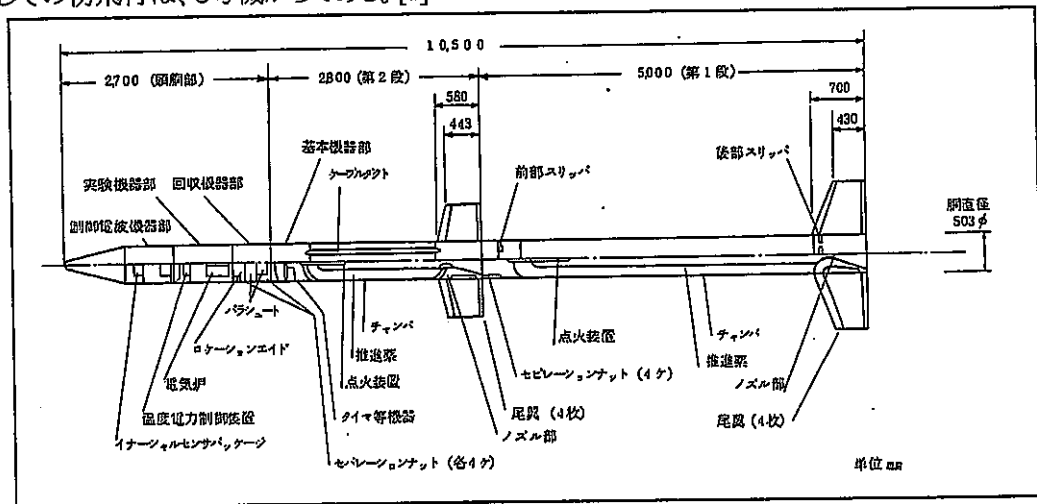


図-2 TT-500A 外観形状

表-1 TT-500A主要諸元

全 段		各 段		
		1 段	2 段	頭胴部
全長 (m)	10.5	5.0	2.8	2.7
最大外径 (m)	0.503	0.503	0.503	0.503
全備重量 (Kg)	2369	1342	719	318
推進薬		BP-31B	BP-31B	
推進薬重量 (Kg)		1021	508	
平均推力 (ton)		11.3**	8.1**	
比推力 (sec)		233.2**	270.4**	
全燃焼時間 (sec)		21.2	23.0	
分離方式	分離ナット+スプリング			

*1: 海面上空燃焼 *2: 真空中

TT-500Aロケットは、直径0.5m、全長10.5mの2段式固体ロケットであり、発射時の重量は2.38トンである。第1段固体ロケットは、JCRロケットで開発されたものであり、第2段固体ロケットは、微小重力実験が搭載できるように推進剤を増加させ、直径を0.4mから0.5mに変更された。回収される頭胴部は、直径0.5m、全長2.7mであり、重量は330kgで、姿勢角速度制御装置、テレメトリ装置、追跡用のレーダトランスポンダ、および回収装置から構成されており、約100kgの材料実験装置が搭載されている。

TT-500Aロケットは、1、2段が尾翼により安定して飛行し第2段燃焼終了後に、高度約100kmで頭胴部が第2段から分離される。分離された頭胴部は、ヨーヨーデスピナにより第2段飛行中に付加されたロール軸回りのスピンを除去し、さらにガスジェット装置により頭胴部の3軸回りの角速度を毎秒 0.2° 以下に制御される。その後、頭胴部は放物線を描いて慣性飛行して高度約300kmに達したのちに、降下する。このようにして得られる大気圏再突入までの約6分間の無重量状態、実際には $1 \times 10^{-4}G$ 以下の微小重力状態を利用して、材料実験が実施された。また、実験中の加速度環境は、テレメトリー装置によって最小分解能が $2 \times 10^{-5}G$ の加速度および毎秒 $1.6 \times 10^{-2}^{\circ}$ の角速度で連続して計測される。

宇宙実験を終えた頭胴部は、再突入時の空力加熱を分散させるために、ガスジェット装置で機軸回りのスピんがかけられる。大気圏に再突入して約80度の迎角で空力的減速を受けたのちに、高度約5kmでバロースイッチが作動して、ドロッグパラシュートが開傘して、さらに10秒後にメインパラシュートを開傘して、頭胴部を毎秒15mの速度まで減速させて、種子島の東方約460kmの海上に着水させる。パラシュートは、開傘時の衝撃を緩和させるためにドロッグ・パラシュートとメイン・パラシュートの2段方式が採用されていた。着水後、頭胴部はフローティングバッグを膨張させて浮遊すると同時に、ビーコン電波およびシーマーカーにより、浮遊位置を航空機および回収船に示す。頭胴部を発見した航空機は回収船を誘導して、最終的に回収船がクレーンで頭胴部を引き上げて持ち帰る。

2.3 宇宙実験の概要

TT-500Aロケットによる宇宙実験は、6回の打ち上げで19の実験がなされた。1号機は1980年(昭和55年)に打ち上げられ、わが国で初めての宇宙実験が行われ、宇宙で製造された試料の回収に成功した。この実験は、ニッケル系合金およびアモルファス半導体の製造が行われたものであり、回収された試料の分析結果により地上では得られない成果があることが確認された。続く2号機および3号機はともに打ち上げ、宇宙実験には成功したものの、回収システムの不具合で宇宙で製造された試料の回収に失敗した。その後回収システムの不具合部分の改良が行われ、4号機、5号機および6号機が打ち上げられて、各種の宇宙実験が行われ、宇宙で製造された試料の回収にも連続して成功した。これらの実験により、非常に興味のある結果が得られたと同時に、各種実験装置の設計・開発のための多くのデータが蓄積され、1992年(平成4年)に毛利宇宙飛行士がシャトルに搭乗して行った、第1次材料実験などの開発に利用された。

TT-500Aロケットの打ち上げ結果で得られた無重量環境は、非常に質の高いものであることが証明された。これは、スペースシャトルや宇宙ステーションのような有人システムでは得られない無重力環境である。

ニッケル系合金やアモルファス半導体などの製造実験には特殊な電気炉が使用されており、ロケット発射後、実験開始とともに試料が加熱され、2分間で熔融状態となり、そのまま2分間一定温度に保たれ、最後の2分間で強制冷却され再突入時の影響を受ける前に凝固する。制御される温度範囲は1450度の場合で、 ± 50 度以下であり、目標温度への加熱・保持・冷却はロケットに

搭載された制御装置、電源および冷却装置により自動的に行われる。TT-500Aロケットには、4個の電気炉が搭載され、目標温度はおのおの実験試料に合わせて最高2000度までに任意に設定が可能である。実験試料の大きさは、直径10mm、長さが40mmである。この実験装置は、宇宙開発事業団のもとに石川島播磨重工業(株)が開発を担当したものである。

宇宙実験を行っている状況は、ロケットに搭載されているテレメトリ装置によってモニタすることが可能である。実験中の装置の作動状態、試料の温度、圧力および重力レベルなどのデータが電波で送信され、地上局で受信することにより同時刻でモニタすることができ、必要な地上からの指令を送信することもできる。

TT-500Aロケットは、宇宙での材料の製造実験のほかにも、電気炉以外のイメージ炉、超音波攪拌炉などを使ったさまざまな予備実験が行われ、多くの有効なデータが得られている。[1]

2.4 宇宙実験と地上実験との比較

TT-500Aロケットで得られた宇宙実験結果と地上実験との比較から無重量環境の有効性が実証されている。ここに、TT-500Aロケットで得られた、各種成果の内から代表的なものを紹介する。

図一3に示すように、ニッケル系合金の宇宙実験で製造された試料を輪切りにして、その断面を磨いた後の顕微鏡写真を見ると、炭化チタン粒子が、ニッケル・モリブデン合金の地に均一に分布した良好な組織であることがわかる。宇宙実験と同様な組成の試料を用いて行った地上実験では、炭化チタン粒子の著しい不均一分布の様子がわかり、宇宙実験の有用性が認められている。宇宙実験を行ったニッケル系合金は、軽量で耐熱性に富む高強度材として期待されており、実用化された場合は航空・宇宙用に広く応用できる。この実験は、金属材料研究所と宇宙開発事業団との共同研究で実施されたものである。

アモルファス化合物半導体の宇宙実験で製造された試料は、地上で製造されたものよりも表面が滑らかであるし、電氣的、光学的特性もはるかに良好であり、アモルファス化の程度もより優れている。アモルファス化合物半導体は、現在の集積回路の素材である結晶シリコンよりも特性がよく、3次元集積回路材料などへの応用が期待されている。この宇宙実験は、理化学研究所と宇宙開発事業団との共同研究で実施されたものである。

単結晶化合物半導体の宇宙実験で得られた試料は、単結晶の成長層が得られているが、地上実験ではこれがみられず、ここでも宇宙実験の有用性が顕著に現れている。これらの半導体は光電変換材料、レーザ発振材料など広い分野での利用が期待されている。この成果も理化学研究所と宇宙開発事業団との共同研究によって得られたものである。

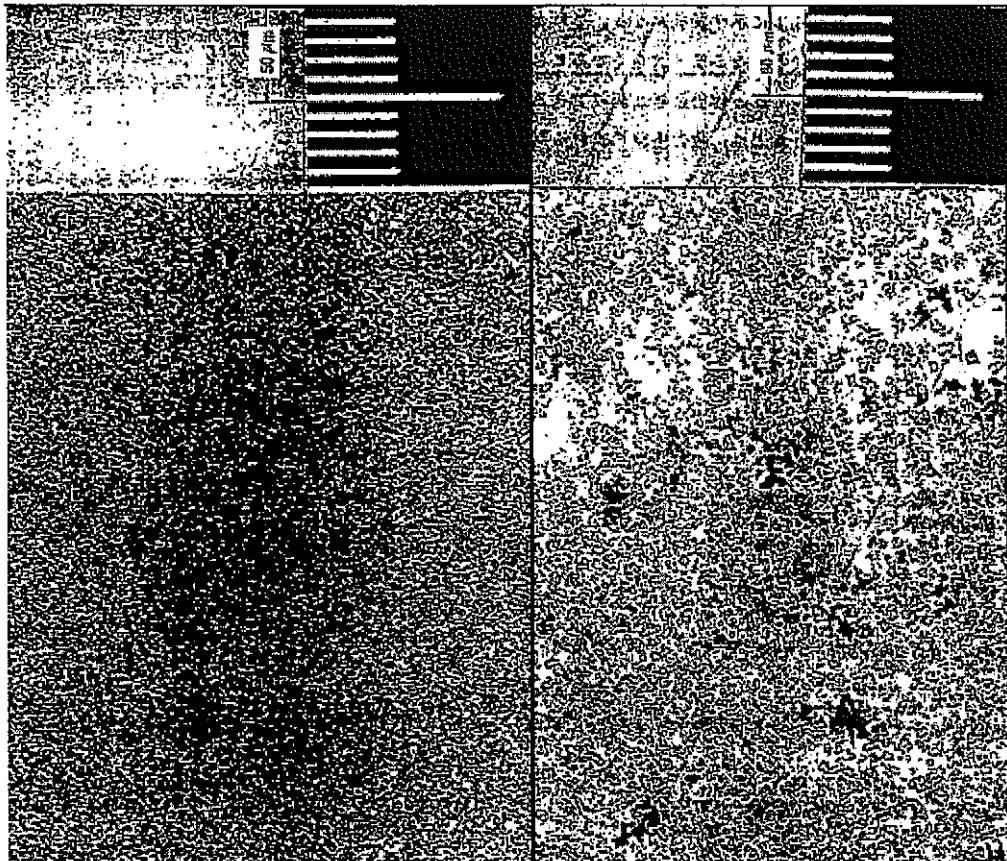


図-3 11号機による飛行実験で回収された飛行実験試料Ni-Mo-TiC Paraticle系合金の光学顕微鏡写真(左)、地上実験試料Ni-Mo-TiC Particle系合金の光学顕微鏡写真(右)[1]

2.5 TT-500Aロケットの成果

TT-500Aロケットは、わが国で初めての宇宙実験を実施して、微小重力環境の有効性を実証しただけでなく、その成果はスペースシャトルによる第1次材料実験(FMPT)や国際微小重力実験室(IML)での実験を成功させるために大きな貢献を果たした。また、ロケット技術はそのまま、大型化された宇宙実験用のTR-1Aロケットに引き継がれている。

また、このロケットによりわが国がそれまでに保有していなかった、宇宙からの再突入技術と回収技術を手に入れた意義は大きなものである。当時、再突入技術は、米国においても公開されていなくて、宇宙開発事業団は航空宇宙技術研究所の協力を得て、国内技術だけを使って手探りで開発したものである。計画の初期においては、300kmの高度から再突入させて広大な海上で回収するのは、太平洋艦隊並の組織がなければ、夢みたいな話だと言われながらも、多くの機関の協力と指導でなんとか開発に移行できたものであった。

幸いにも、1号機で回収に成功したが、2号機ではロケットの打ち上げ、宇宙実験および再突入・パラシュートの開傘まで全て成功したが、最後のフローティングバッグを膨らます液化炭酸ガスの供給に失敗して、貴重な試料を海底に沈めてしまった。液化炭酸ガスをフローティングバッグに供給するのに、着水と同時に和紙が溶けて撃針が封板を破る方式が採用されていた。失敗の

原因は、この和紙の溶けるタイミングのパラツキが予想以上に遅れたことにより、頭胴部が海面下に沈み過ぎて炭酸ガス圧力よりも水圧が高くなってバッグが膨らまなかったためであった。

表-2 TT-500Aロケットによる宇宙材料実験の概要

号機	打上日	実験テーマ	共同実験機関等	実験装置作動状況	加速度環境	成果
8 (初号機)	55.9.14	ニッケル系合金製造実験 (電気炉:1台)	科学技術庁金属材料 技術研究所	正常に作動	8.0×10 ⁻² g	均一な分布をもち、硬度も地上の2 倍以上のチタンカーバイト・ウイス カ分散型ニッケル基耐熱合金が得 られた。
		ニッケル系合金製造実験 (電気炉:1台)	同上	電気炉が異常昇温		電気炉異常昇温により、試料は得 られなかった。
		アモルファス半導体製造 実験(電気炉:1台)	理化学研究所	正常に作動		地上実験と比べてはるかに滑らか な試料表面を持つ均質なアモル ファス半導体が得られた。
		VHFアンテナの温度測定	宇宙開発事業団 ロケット設計グループ	正常	頭胴部環境	打上げ時及び大気圏再突入時アン テナの空力加熱による温度上昇 データが得られた。
9	56.1.16	ニッケル系合金製造実験 (電気炉:3台)	科学技術庁金属材料 技術研究所	正常に作動	1×10 ⁻⁴ g	頭胴部の回収に失敗したため、試 料は得られなかった。
		アモルファス半導体製造 実験(電気炉:1台)	理化学研究所	正常に作動		
10	56.8.2	アモルファス半導体製造 実験(電気炉:3台)	理化学研究所	正常に作動	1×10 ⁻⁴ g	頭胴部の回収に失敗したため、試 料は得られなかった。
		単結晶化合物半導体製造 実験(電気炉:1台)	同上	正常に作動		
11	57.8.16	ニッケル系合金製造実験 (電気炉:1台)	科学技術庁金属材料 技術研究所	正常に作動	1×10 ⁻⁴ g	均一な分布を持つ、チタンカーバ イド粒子分散型ニッケル基耐熱合 金が得られた。
		アモルファス半導体製造 実験(電気炉:1台)	理化学研究所	電気炉が異常昇温		電気炉異常昇温により、試料は得 られなかった。
12	58.1.27	アモルファス半導体製造 実験(電気炉:1台)	理化学研究所	正常に作動	1×10 ⁻⁴ g以下	不純物や欠陥の少ない高品質なア モルファス組織を持つ試料が得ら れた。
		単結晶化合物半導体製造 実験(電気炉:1台)	同上	正常に作動		均質な鉛・スズ・テルルの薄膜結晶 が得られた。
		ハロゲンランプ機能確認 (ハロゲンランプ実験装 置:1台)	宇宙開発事業団ス ペースシャトル利用推 進室	正常に作動		無重量下における、ハロゲンサイ クルを確認した。
13	58.8.19	ガス封入型電気炉機能確 認及び炭素繊維強化発泡 金属複合材料製造実験 (電気炉:1台)	宇宙開発事業団ス ペースシャトル利用推 進室	電気炉が異常昇温	1×10 ⁻⁴ g以下	ガス封入型電気炉の加熱、冷却特 性データを得た。炭素繊維が十分 にランダムに配向した炭素繊維複 合材料が得られた。
		摺拌装置付電気炉機能確 認及び非混合系合金複合 材料製造実験 (電気炉:1台)	同上	正常に作動		無重量下における超音波攪拌効 果を確認した。微細分散組織を持 つ偏晶合金が得られた。
		小型イメージ炉機能確認 及び粒子分散型ガラス複 合材料製造実験(小型イ メージ炉実験装置:1台)	同上	正常に作動		小型イメージ炉の加熱特性データ を得た。等方向で高い破壊靱性を 持つ、ダイヤ粒子均一分散型複合 ガラスが得られた。
		地球赤外線測定実験 (2段基本機器部に搭載)	航空宇宙技術研究所	正常に作動		2段尾翼により ロール軸まわりに 約3Hzで回転そ の後自由落下

この対策として、着水と同時に海水電池が作動して、火薬力により撃針が瞬間的に封板を破りバッグを膨らます方式に変更された。この確認のために真冬の寒さのなかで、休日返上で水を使った実験を行った。この対策を施した3号機が半年後に打ち上げられた。この号機も宇宙実験、再突入およびドローグパラシュートの開傘までは正常であったが、メインパラシュートが開傘しなくてまたまた海に沈めてしまった。得られたデータを分析した結果、メインパラシュートを放出するセパレーションナットが作動しなかったためであり、この原因は再突入時の加熱と頭胴部の変形による、過大なフラットスピンに伴う加速度が加わり、火工品回路が断線したものであった。このため頭胴部の外板の強度・剛性を増加させると同時に、耐熱性を高める設計変更を行った。

この対策を確認するために、今回は真夏の盛りに火を使った加熱試験に明け暮れた。4号機は3号機の1年後に打ち上げられ、全てが順調に作動して、完全な成功を納め2号機と3号機の不具合対策が正しかったことが確認できた。この間、宇宙開発事業団の担当者、第1、2段ロケットおよび回収システムを担当した日産自動車(株)の技術者・試験担当者の努力と苦労は大変なものであった。このように大気圏再突入技術という、まったく新しいものを開発するには、少なくとも3機程度の試験飛行によって設計データを集める、必要があったのではなかったかと痛感した。このように、非常な苦労を重ねて開発された回収技術は、TR-1およびTR-1Aロケットに引き継がれただけでなく、平成6年2月4日に打ち上げられた、純国産の大型ロケットH-2の1号機に搭載された軌道再突入実験機(オレックス)を成功に導いた。オレックスは、わが国で最初の周回軌道からの回収を行ったものであり、宇宙開発事業団が研究を進めている宇宙往還機「ホープ」の設計データ取得が目的であった。表-2にTT-500Aの実験成果を示す。

3. TR-1Aロケットの開発

3.1 開発の経緯

小型ロケットによる微小重力実験は、宇宙開発事業団が1983(昭和58)年までにTT-500Aロケットで6回の材料実験を行って以来、途絶えていた。1989年(昭和64年)に宇宙開発事業団は、宇宙環境利用の技術基盤整備の一環としての予備実験手段の確保、および宇宙ステーションでの各種実験に必要な共通の基盤技術を開発するために、小型ロケットによる宇宙実験を再開することとした。[2]

この「小型ロケット微小重力実験計画」に用いられたロケットが、TR-1Aロケットである。このロケットは、750kgの実験装置を搭載して、10-4G以下の微小重力環境を6分間得られ、宇宙ステーションよりも良質な微小重力環境を達成できるとともに、スペースシャトルなどの有人システムに比べて、安全性の面できびしい要求を必要としないこと、また、計画から実験実施まで比較的短時間で可能なため、より良い条件での宇宙実験ができることになる。

この計画では、TR-1Aロケットおよび6種類の実験装置と実験支援系が開発され、平成3年から平成5年まで年1機ベースで、3回の打ち上げを行い、合計15テーマの微小重力実験を成功裡に実施された。TR-1Aロケット1号機から3号機までの開発・運用を通して、小型ロケットTR-1Aによる宇宙実験手段を確立するとともに、基礎的な宇宙実験技術および貴重な科学技術

データの取得を行うことができた。この成果は、微小重力研究分野の専門家から高い評価を受けている。

これに引き続き、本格的な宇宙ステーション利用に至るまでの有力な予備実験手段として小型ロケットを活用し、宇宙環境利用の促進および宇宙ステーションでの各種実験に必要な宇宙実験技術の高度化などのために、平成7年から宇宙実験を行った。1995年(平成7年)8月にTR-1Aロケット4号機、1996年(平成8年)9月に5号機、1997年(平成9年)9月に6号機を、1998年(平成10年)9月に7号機を打ち上げ、合計22テーマの宇宙実験を行った。

3.2 TR-1Aロケットの概要

TR-1Aロケットは、これまでのTT-500Aロケットを含む小型ロケットの開発で得られた技術および経験を活用して計画が進められた。

このロケットは、H-2ロケットの開発の一環として開発された、試験用ロケットを改良して微小重力実験ができるように改良されたものである。

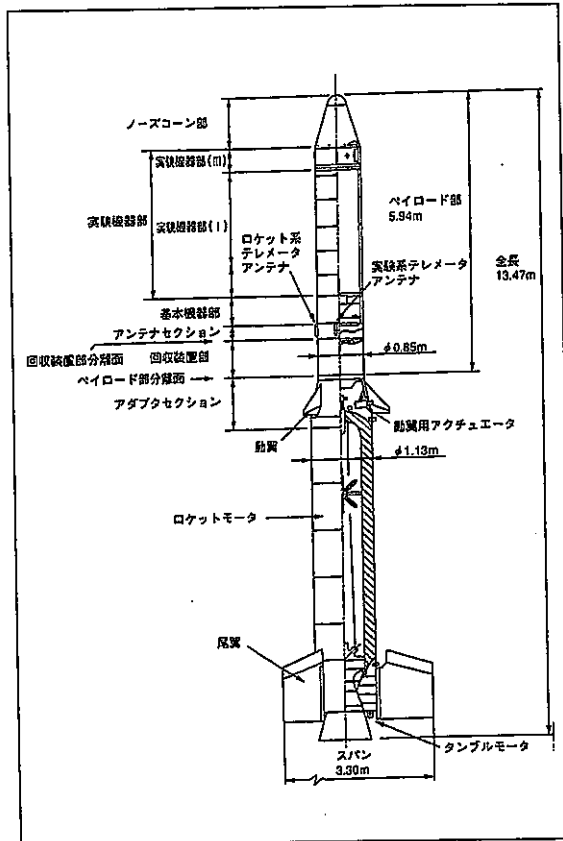


図-4 TR-1A 外観形状

H-2ロケットの開発にあたって、地上試験やシミュレーション解析では得ることのできない技術的な課題を解決するために、H-IIロケットの四分の一縮尺の試験用ロケットが、1988年(昭和63年)から1989年(64年)にかけて3機打ち上げられた。この試験用ロケットが、固体推進剤を使った1段式のTR-1ロケットであり、空力荷重、空力加熱、音響振動、固体ロケット(SRB)の分離挙動の観察など種々のデータが取得された。これらのデータは、H-IIロケット開発のために、従来のH-1ロケットまでの機体開発の延長上ではとらえきれない多くの技術的不確定さを解決するのに役だった。TR-1Aロケットは、従来の小型ロケットと異なって、回収を容易にするために新たに、動翼を用いた姿勢制御の機能が付加されている。これまでのTT-500Aロケットのように推力飛行時の制御をしない場合は最高到達高度を250km以上にすると着水地点が

種子島宇宙センタから約500kmも離れるし、風などの原因によって頭胴部の落下分散域が半径約100kmと広く、探索・回収作業の効率が悪かった。このために、TR-1Aロケットでは、発射と同時に動翼により姿勢制御を行って、落下地点を種子島から約180kmまで引き寄せるとともに、落下分散域を半15kmまで縮小することが可能となり、回収作業の効率を上げることができた。

また、TR-1Aロケットでは、頭胴部を水密構造に変更してある。この理由は、TT-500Aロケ

ットの2、3号機のように、着水した時に万が一フローティングバッグが作動しなくても、自力で浮遊することができ回収の確立がはるかに向上すること、実験装置の再利用が可能となり実験費用を減少できるためでもある。TR-1Aロケットは、TT-500Aロケットに比べて実験装置の搭載重量が約10倍、体積では直径0.5m、長さが1.0mから直径0.85m、長さが2.4mと約7倍に向上したが、固体ロケットの1段式であるためロケットの打ち上げ費用は安くすることが可能であった。[2]

TR-1Aロケットは図-4に示されるように、直径が1.1m、全長は12.90mであり、発射時の重量が10.3トンの1段式固体ロケットである。固体ロケットは、直径1.1m、全長7.0mであり、約7トンのポリブタジエン系推進剤が充填されている。頭胴部と固体ロケットの間の機体中央部には、4枚の動翼が装着され電動アクチュエータで駆動され、頭胴部を分離する火工品が装着されている。

頭胴部は、直径が0.85m、長さが5.37m、重量が1.6トンである。頭胴部の後端には回収装置部があり、内部にパラシュートやフローティングバッグなどが収納されている。基本機器部には、ファイバージャイロを用いた慣性センサ装置、制御電子装置、電力装置や電波機器が搭載されている。実験機器部は長さが2.4mで、750kgの微小重力実験装置を搭載することができる。頭胴部の先端には、頭胴部の姿勢角速度を毎秒0.2度以下に制御するための、窒素ガスで推力を発生させるガスジェット装置が搭載されている。

3.3 飛行および回収計画

TR-1Aロケットは、種子島宇宙センタの竹崎射点から打ち上げられ、発射後1秒から63秒まで、動翼でピッチ・ヨー軸を発射時の姿勢に保持するための制御がなされる。発射後64秒で頭胴部が分離され、ガスジェット装置により3軸の姿勢角速度を安定させて微小重力環境を実現して、発射後80秒から440秒まで宇宙実験が行われる。図-5に7号機の飛行計画を示す。

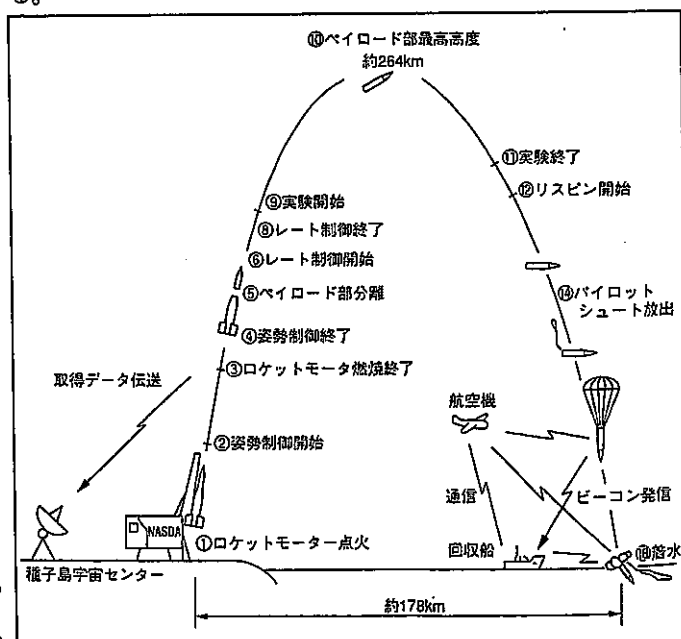


図-5 TR-1A 7号機飛行計画

宇宙実験は、頭胴部が高度100kmに降下する前に終了し、再突入時の空力加熱による頭胴部の温度上昇を平均化するために、頭胴部にはガスジェット装置により機軸回りの回転が与えられる。その後、大迎角姿勢で大気に再突入し、空気力による減速を受けながら動圧の高い領域を通過して、高度5kmまで降下した時点でバロースイッチが作動してパイロットパラシュートが放出される。この後、火工品によるシーケンスでドロッグおよびメインパラシュートが順次開傘して、頭胴部は、最終的に毎秒13mの速度で海面に着水する。メインパラシュート放出時点からビーコン電波が発信され、その電波を手がかりにして捜索が開始される。海上では頭胴部は水密部の浮力により浮遊するが、さらに海水電池が

作動して火工品で液化炭酸ガスボンベを開封し、フローティングバッグが膨張して万一の場合の浮力が確保される。また、シーマーカが海面上に広がり、航空機の探索の助けとなる。

落下予想海域付近には、探索用の航空機と回収船が待機しており、種子島の指令管制棟より頭胴部の落下予想位置の連絡を受けて落下海域に向かう。航空機は、ビーコン電波とシーマーカを目標にして探索を行い、発見後は浮遊位置まで回収船を誘導する。頭胴部は、回収船のクレーンを用いて甲板上に収納される。

3.4 開発の成果

TR-1Aロケットの開発は、平成元年に開始され、新規開発要素である制御系機器、回収装置を中心とした各コンポーネント、および機体構造などの開発試験が実施された。1990年(平成2年)4月に仕様が決定的されて、1991年(平成3年)4月には開発試験が全て終了して設計の妥当性が確認された。TR-1Aロケットは、1号機が1991年(平成3年)9月、2号機が1992年(平成4年)8月、さらに3号機が1993年(平成5年)9月に打ち上げられ、それぞれロケットの飛行、微小重力環境の達成、実験装置の作動、頭胴部の回収に成功している。また、6種類の実験装置の開発がなされ、15の実験テーマの宇宙実験にも成功して、今後の宇宙ステーションにおける実験に先立つ予備的な確認、および実験装置の開発がなされ、初期の目的を達成することができた。

表-3から表-9にTR-1Aで実施された全ての宇宙実験の成果概要を示す。[2],[5],[8]

表-3 TR-1A 1号機の宇宙実験成果概要

号機	打上げ日	実験テーマ/使用実験装置	実験協力者	微小重量環境	実験装置の作動状況	科学的成果
1号機(初号機)	平成3年9月16日	結晶成長時における界面及び環境相のその場観察実験(ヨウ化カドミウム結晶成長のその場観察実験) 観察技術実験装置	東北大学 塚本 勝男	1X 10 -4g以下	溶液中への一部気泡混入を除き正常に作動	世界で初めて温度勾配による気泡周囲のマランゴニ対流の観察に成功した。また温度勾配と温度勾配に起因するマランゴニ対流の振動的流れを見出し、結晶成長に及ぼす流れの影響に関する知見を得た。
		マランゴニ対流の発生とその制御に関する実験 (マランゴニ対流及び表面張力波の観察実験) 流体物理基礎特性測定装置	航空宇宙技術研究所 東 久雄		正常に作動	実験結果はマランゴニ対流の数値解析結果とほぼ一致し数値解析の妥当性が証明された。
		気泡の発生、成長および移動に関する実験 (沸騰気泡発生実験) 微小重力維持技術実験装置	工業技術院電子技術総合研究所 阿部 宣之		正常に作動	沸騰現象が地上と比較して著しく異なる。膜沸騰が非常に生じやすいという結果を得た。また気泡と加熱面の間に存在する薄い液体膜については、地上実験結果と異なり感熱部分が存在せず、ほぼ均一な厚さの液体膜が形成されるという結果を得た。
		粒子分散合金の溶融・凝固実験 汎用加熱装置	金属材料技術研究所 村松祐治		正常に作動	地上では粒子と母相の密度差により容易に分離が生じてしまうため、濡れ性という極めて微小な値からが粒子の分散状態に与える影響の評価は極めて困難である。今回微小重力下で溶融、凝固した資料の内部組織は濡れ性によって著しく相違し、分散状態に及ぼす濡れ性の影響が明らかになった。この結果により微小重力下で均一分散を図るためには、母相と粒子の濡れ性の改善を図ることが重要であるとの結論を得た。
		酸化物高温超伝導体の溶融・凝固実験 高温加熱装置	金属材料技術研究所 戸叶 一正		正常に作動	微小重力下で高い温度勾配がついた場合の構成元素の拡散・気泡の移動と内部組織の詳細な相関係が明らかになった。これより微小重力を利用した高温酸化物超伝導体の高電流密度化を達成するためには試料内部の温度の均一化、希望の除去等を通じて分散相の微細化、均一分散化を図っていくことが重要であるとの結論を得た。

表-4 TR-1A 2号機の宇宙実験成果概要

号機	打上げ日 (平成)	実験テーマ/使用実験装置	実験協力者	定常的 微小重力環境	実験装置の 作動状況	科学的成果	
2号機	4.8.20	結晶成長時における界面及び環境相のその場観察実験 (融解過程の可視化実験) ・観察技術実験装置	宇宙科学研究所 黒林 一彦	1×10 ⁻⁴ g以下	正常に作動	地上実験に比べ、拡散層の明らかな広がりか観察され、液相中の溶質拡散が融解過程の律速因子であることが判明した。この拡散層の広がりやを基により精度の高い拡散係数を求めることができた。	
		マランゴニ対流の発生とその制御に関する実験 (マランゴニ対流現象の微細機構の観察実験) ・流体物理基礎特性測定装置	早稲田大学 平田 彰		正常に作動	マランゴニ対流の層流状態から振動流状態への遷移過程では、観察上は層流状態においても約10秒の周期での温度変動が観察され、時間の経過とともに振幅が増大し、明らかな振動流状態となった。この遷移過程を詳細に測定し、振動流を今回のように鮮明に観察した実験例は過去に無く、貴重なデータを取得することができた。	
		気泡の発生、成長及び移動に関する実験 (気泡挙動観察実験) ・微小重力維持技術実験装置	朝三薬品研究所 石川 正道		正常に作動	気泡生成位置のずれ、気泡の分裂・合体等を除き正常に作動	気泡の運動解析の結果、①定常的な残留重力に対する浮力応答、②微小な周期的人工加速度に対する浮力応答、③同周期的運動に伴う泡と気泡との相互作用力を明らかにした。さらに、特異な現象として加速度の発生していない方向への気泡の移動現象が見出された。これは、気泡の動きに伴う流れの発生と容器壁との相互作用により説明できることを明らかにした。
		半導体の融液成長実験 ・温度勾配型加熱装置	東京大学 西永 瑛		正常に作動	正常に作動	微小重力下での急速成長において単結晶成長に成長した。また、試料の溶融・成長時の固液界面の移動速度をその場観察により直接測定することができた。この実験から、微小重力を利用した急速単結晶成長の可能性が明らかとなった。
		ガラス材料の溶融・凝固実験 ・高温加熱装置	大阪工業技術研究所 早川 博二		正常に作動	正常に作動	過冷却からの凝固過程で、試料内部に存在した気泡による過冷却液体のマランゴニ対流が観察された。また、この気泡の試料からの離脱により過冷却液体に振動が生じ、このため過冷却液体中に新たな核発生が見られ、振動誘起核発生現象の観察に成功した。 凝固固液界面の進展は、進行と停滞が交互に生じる特異な現象を見出しメカニズムの解明に成功した。

表-5 TR-1A 3号機の宇宙実験成果概要

号機	打上げ日 (平成)	実験テーマ/使用実験装置	実験協力者	定常的 微小重力環境	実験装置の 作動状況	科学的成果	
3号機	5.9.17	結晶成長時における界面及び環境相のその場観察実験 (高圧付加に伴う溶液からの結晶成長実験) ・観察技術実験装置	無機材質研究所 沢田 勉	1×10 ⁻⁴ g以下	正常に作動	微小重力下では、拡散過程が支配的であることが確認できた。このため、主枝の方向に関わりなく、均一な成長速度となった。なお、地上実験では、樹枝状結晶成長が進むに従い、溶質濃度差に起因する対流が発通していく。このため、対流の下流側(上側)の溶質濃度が低下し、上側主枝の成長速度が小さくなる。	
		マランゴニ対流の発生とその制御に関する実験 (電気力によるマランゴニ対流の制御実験) ・流体物理基礎特性測定装置	石川島播磨重工業㈱ 桑原 啓一		正常に作動	電流電場を付加することにより、シリコンオイル中に電気力対流が発生することが確認できた。層流のマランゴニ対流は、ディスク間の温度差が10Kにおいて発生し、振動流のマランゴニ対流は、50Kで発生した。振動流の周期は約10秒であった。電気力による流れの方向を制御することにより、流れの促進または抑制を行なうことができた。電気力対流を説明するための方程式を新たに組み立てることにより、実験結果をよく説明することができた。	
		気泡の発生、成長及び移動に関する実験 (気泡操作実験) ・微小重力維持技術実験装置	三菱重工業㈱ 石井 伸也		正常に作動	正常に作動	定在波音場により気泡に並進運動を発生させることができた。さらに、気泡外部の圧力変動に対する気泡内部圧力変化の位相のずれが気泡の大きさにより変化することを考慮に入れたモデルを構築することにより、並進速度を定量的に予測する手法を確立することができた。
		高融点複合化合物の合成実験 ・汎用加熱装置	東京工業大学 小田原 修		正常に作動	正常に作動	フライト実験で得られた燃焼合成生成物は、地上実験で得られた生成物に比べて、(1)ZrO ₂ -Al ₂ O ₃ -Fe系では粒子が微細化し、(2)TiB ₂ -Al-B系では複合構造粒子化及びバーメット化が促進され、(3)TiB ₂ -TiB系ではTiB ₅ の存在が確認された。
		微小重力下での臭化鉛試料の溶融・凝固過程の観察 ・温度勾配型加熱装置	日本電信電話㈱ 木下 恭一	正常に作動	正常に作動	流れが1mm/s程度以下の場合、界面形状は融液側に凸、3mm/s程度以上の場合、界面形状は融液側に凹のようになり、融液内の流れと固液界面形状との相関が明らかになった。また、1.5mm/s程度の流れが観測された。この流れは、融液の一部に自由表面が形成されたことによるマランゴニ対流である可能性がある。さらに、安定成長から不安定成長に至る臨界の温度勾配と固化速度の比が実験的に得られた。この臨界値は、融液内の流れの速さに強く依存し、流れが遅い程、不安定成長しやすかった。	

表-6 TR-1A 4号機の宇宙実験成果概要

号機	打上げ日 (平成)	実験テーマ/使用実験装置	代表研究者	定常的 微小重力環境	実験装置の 作動状況	科学的成果
4号機	7.8.25	多面体結晶形態安定性理論の微小重力下での検証 ・観察技術実験装置Ⅱ型	東北大学 塚本 勝男	1×10 ⁻⁶ g以下	正常に作動	結晶面が成長する様子の分子レベルでの観察に成功し、ごく微小な結晶成長速度と成長面近傍の溶液濃度との関係を微小重力環境下で初めて計測することができた。この結果から、地上では溶液中の不純物が成長面に付着し成長核が形成されるが、微小重力下ではこの成長核が形成されないことを世界に先駆けて見出した。
		微小重力下でのスズ-鉛共晶系合金の凝固 ・温度勾配型加熱装置	千葉工業大学 茂本 徹一		正常に作動	凝固分野における長年の問題であった共晶系合金の重力による偏析メカニズムについて、微小重力を利用することにより、この系の重力偏析の原因が結晶粒と融液との密度差による沈降・浮上によって生じることが世界で初めて明らかとされた。
		微小重力下の化合物半導体鉛-スズテルルの融液拡散係数の測定 ・汎用加熱装置	石川島播磨重工業(株) 内田 美佐子		正常に作動	鉛・スズ・テルル化合物半導体の1000℃における拡散係数の測定ができ、拡散係数測定における微小重力利用の有効性が示された。
		液柱マランゴニ対流による振動流の3次元観察 ・流体物理実験装置Ⅱ型	東京理科大学 河村 洋		正常に作動	世界で初めて液柱マランゴニ対流において粒子の位置・速度を3次元的に計測することに成功した。これにより流速分布および振動マランゴニ対流の温度振動周期を求めることができた。
		フローティングゾーン シリコンメルト内の温度変動の測定 ・高温加熱装置Ⅱ型	日本電気(株) 日比谷 孟俊		正常に作動	微小重力下のシリコン半導体融液の振動マランゴニ対流を世界で初めて観察することに成功し、シリコン融液のマランゴニ対流のメカニズム解明にとって貴重な基礎データを取得できた。

表-7 TR-1A 5号機の宇宙実験成果概要

号機	打上げ日 (平成)	実験テーマ/使用実験装置	代表研究者	定常的 微小重力環境	実験装置の 作動状況	科学的成果	
5号機	8.9.25	分散系の自己組み立て成長 ・観察技術実験装置Ⅱ型	㈱三菱総合研究所 石川 正道	1×10 ⁻⁶ g以下	正常に作動	コロイド結晶成長のメカニズムが、地上では沈降粒子の合体成長によるが、微小重力下では拡散により成長することが明らかとなった。また、微小重力下で成長した結晶は、地上での結晶と比較して格子間隔が大きいことが明らかとなった。コロイド結晶の本質を知る上で微小重力実験が重要であることが示された。	
		微小重力場での核沸騰熱伝達機構に関する基礎実験 ・流体物理実験装置Ⅱ型	九州大学 大田 治彦		正常に作動	微小重力環境下での沸騰で生じた気泡が観察され、その観測・計測を行なうことができた。気泡底部の温度・液膜厚さ測定から、熱伝達機構を解明するための従来にならぬ高精度なデータが得られた。データ解析の結果、微小重力下における沸騰熱伝達機構では、気泡底部に形成されるミクロ薄膜の蒸発が支配的であることがわかった。	
		均一噴霧の生成及びその燃焼 ・燃焼現象実験装置	石川島播磨重工業(株) 佐藤 順一		正常に作動	燃料注入量が少なかったこと以外正常に作動	実験装置は、燃料注入量が計測値より少なく、予定した大きさの液滴は得られなかったが、地上では観察不可能であった希薄気体混合気での燃焼は、火炎伝播が途中で消失するという極めて特異な挙動を示した。
		微小重力環境における融液の間隙浸透性 ・多目的均熱炉	金属材料技術研究所 佐部 謙		正常に作動	正常に作動	溶融金属の浸透挙動と温度分布・間隙との関係の評価した結果、均熱の場合は間隙の狭い方に、温度勾配下にある等しい間隙では低温側から溶融材が浸透する等、溶融材の浸透挙動の理論検証が成され、またマランゴニ対流による隙間浸透現象が世界で初めて観察された。
		ゲルマニウム半導体融液の自己拡散の研究 ・多目的均熱炉 シアーセル法によるゲルマニウム半導体融液の高精度拡散係数測定技術の開発 ・多目的均熱炉	北海道大学 伊丹 俊夫 宇宙開発事業団 依田 真一		正常に作動	正常に作動	従来の地上実験の実験値に比べ微小重力環境で測定した拡散係数は20%程度小さい値が得られ、微小重力下で極めて精度のよい実験値が得られた。拡散係数の温度依存性は温度Tの1乗に比例する値となり、拡散係数は非常に大きな温度依存性を持つことがわかった。 シアーセル法を用いた微小重力実験が世界で初めて行なわれ、溶融試料の拡散対の形成、セグメント化も順調に行なうことができた。 取得された1200℃でのゲルマニウムの拡散係数は、地上の測定結果と比較し30%程度小さい値が得られ、対流の除去及び加熱・非定常領域の拡散量の除去、凝固の影響などを除くことができ、高精度の測定を行なうことができた。

表-8 TR-1A 6号機の宇宙実験成果概要

号機	打上げ日 (平成)	実験テーマ/使用実験装置	代表研究者	定常的 微小重力環境	実験装置の 作動状況	実験結果の概要
6号機	9.9.25	非定常マランゴニ対流の3次元流動と液柱表面温度の同時観測 ・流体物理実験装置Ⅱ型	横浜国立大学 西野 耕一	1×10 ⁻⁴ g以下	液柱形状が楕型になったこと以外正常に作動	液柱形成時に試料であるシリコンオイルの一部が保持ディスク外へ流出し液柱形状が楕型となったが、流れ場の3次元観察と液柱表面温度分布の同時計測を行なうことができた。
		液体金属の自己拡散係数における同位体効果の研究 ・多目的均熱炉	北海道大学 伊丹 俊夫		正常に作動	安定同位体をトレーサとした実験試料(リチウム)を、微小重力環境下で3種類の温度(400、370、320°C)で溶解・凝固することができ、ロンクヤピラリ法を用いて実施した拡散実験の試料を取得することができ、拡散係数の算出を行なうことができた。
		微小重力環境でのAl-Ti包晶系合金の凝固組織 ・多目的均熱炉	千葉工業大学 茂木 徹一		正常に作動	微小重力期間中に全実験試料の溶解・凝固が行なわれていることが確認された。回収された実験試料カートリッジを分解した結果、今後の解析を行なうことのできる試料を取得することができ、微小重力環境で溶融凝固した包晶合金の組織観察を行なうことができた。
		骨芽細胞の増殖関連遺伝子などの発現に及ぼす微小重力の影響 ・培養細胞実験装置	宇宙開発事業団 佐藤 重暁		正常に作動	所定の刺激液、固定液などの液交換や所定の温度保持を行なうことができ、解析を行なうことのできる実験試料の取得を行なうことができた。 試料解析の結果、微小重力下での細胞内信号伝達による遺伝子発現量の変化等が計測された。
		シリコンメルト液柱内の対流可視化観察 ・高温加熱装置Ⅱ型	日本電気㈱ 日比谷 益俊		正常に作動	シリコン融液柱の形成やマランゴニ対流による液柱表面温度振動計測を行なうことができた。X線による液柱内部の流れ場可視化計測については、実験途中からトレーサが液柱表面に保持され対流に追従しなくなったが、位置変動の様子がX線透過画像により取得できた。

表-9 TR-1A 7号機の宇宙実験成果概要

号機	打上げ日 (平成)	実験テーマ/使用実験装置	代表研究者	定常的 微小重力環境	実験装置の 作動状況	実験結果の概要
7号機	10.11.19	水の樹枝状成長におけるパターン形成への微小重力の効果 ・観察技術実験装置Ⅱ型	北海道大学 古川 義純	1×10 ⁻⁴ g以下	干渉計画像のVTRが実験途中で停止したこと以外正常に作動	支持体のない状態で水が自由成長する様子が世界で初めて観測できた。実体観察画像から、水の結晶成長が円盤状からはじまり、成長に伴い円板の縁で形態不安定性が起り、最終的に樹枝状結晶が生成する様子を観察することができた。そして、樹枝結晶先端の3次元形状は地上実験時と同様に非対称性を示すことが明らかとなり、この非対称性は重力対流に起因しないことを明らかにすることができた。
		高熔点金属製複相結体の拡散の研究 ・多目的均熱炉	北海道大学/宇宙開発事業団 伊丹 俊夫		正常に作動	銀-銅系合金について、系統的に濃度と拡散係数の関係を調べ、3種類の異なる温度での実験データの取得に成功した。銀及び銅の自己拡散係数の温度依存性は剛体球模型を用いた理論値とほぼ一致し、剛体球模型の応用範囲拡大の可能性を示した。 また、濃度が高くなるにつれて銀および銅の自己拡散係数が増加する傾向があり、濃度の増加に伴って結晶が粗な構造になっていると考えられることが判明した。
		InAs-GaAs相互拡散係数の測定 ・多目的均熱炉	NTT/宇宙開発事業団		正常に作動	従来測定例のなかった高濃度GaAsを含む広い組成範囲にわたり、InAs-GaAs相互拡散係数を世界で初めて測定することに成功した。測定温度は1070、1120、1200°Cで、Inの自己拡散係数を含めて、有効数字2桁の精度を達成した。解析結果から、拡散係数のIn/Ga比依存性を算出でき、また新たな知見として拡散係数に及ぼす磁素濃度の依存性を示すことができ、地上研究を含めた今後の化合物半導体結晶成長実験にとって重要なデータを取得することができた。
		培養細胞の増殖、分化に及ぼす微小重力の影響 ・培養細胞実験装置	木下 恭一 理化学研究所		正常に作動	細胞の形態を保存して信号伝達の様子を解析する手法を導入し、核内に移行したリン酸化タンパク質が少ないという結果が得られ、微小重力下では細胞内のタンパク質の細胞核への移行が遅れたために、信号伝達に遅れが生じた可能性があることを示すことができた。
		均一分散噴霧中の火災伝播に関する研究 ・燃焼現象実験装置	長田 裕之 日本大学		打上げ後80秒	予備実験として実施した落下塔実験や航空機実験により取得された短時間微小重力実験のデータから、噴霧液滴径の変化により火災形状が変化することや、燃料蒸気の一部を微小噴霧に置き換えることによって、希薄混合気では火災伝播を促進できることなど、新たな知見を得ることができた。
宇宙ステーション用静電浮遊炉の微小重力下における位置制御機能の確認 ・静電浮遊炉	野村 浩司 宇宙開発事業団	の実験開始直後	静電浮遊炉開発の礎となる技術である微小重力下における試料の位置制御機能の検証を行なうことに成功した。微小重力下で溶融凝固した実験試料について電子顕微鏡観察や誘電率測定等を行なったところ、地上実験試料では観察されなかったアモルファス中に分散するナノ結晶を観察することができ、またこれまで報告されていない特異な磁性を有することがわかった。			

回収に要する時間について、それぞれ2～3時間で回収船に引き上げており、比較的短時間で確実に回収が可能であることが実証された。搭載実験装置の再使用性に関しても、問題なく実施されている。その後、4号機を1995年(平成7年)に打ち上げ、1996年から1998年まで毎年1機ずつ打ち上げられ、合計すると22テーマの宇宙実験が行われた。TR-1Aロケットでの実験は、宇宙ステーションの初期利用に向けた宇宙実験技術の高度化、共通実験装置の要素技術の開発など、当面の技術開発目的を達成したため、7号機で終了された。この計画には、100名以上の研究者が参加し、合計39テーマの微小重力実験が行われ、我が国の宇宙環境利用の促進に大きく貢献することができた。

4. 宇宙環境利用の現状と今後の展望

宇宙ステーションの建造計画は、米国の予算超過やロシアの参加、コロンビア号の事故などで、当初の予定から大幅に遅延しており、我が国の実験モジュールの打ち上げも未だに実施されておらず、利用できるのは2010年以降と見込まれている。また、それに代わる手段として、あるいは宇宙ステーション利用の準備実験に予定されていた小型ロケットによる無重量実験も1998年のTR-1A、7号機以来運用が中止されており、宇宙環境を利用した科学技術研究に関する研究者、技術者の意欲が維持出来難い状況であることが心配される。[8]

日本の軌道モジュール「きぼう」の早期の打ち上げが待たれるが、打ち上げ後に継続して実験を行なうには軌道上への補給手段が大変重要になってくる。残念ながら米国のスペースシャトルは2010年の退役が決まっており、今のところそれに代わる手段のひとつとして日本のHTVに寄せられる期待は大きい。[6] しかしながら、宇宙ステーションを利用した実験はどうしても高価で機会も限定されたものにならざるを得ない。

小型ロケットによる宇宙実験は有人宇宙ステーションによる軌道上実験と互いに補完関係にありどちらかで全てをまかなうことは現実的でない。従って、ISS運用後も小型ロケットを利用した宇宙実験は継続していくものと考えられる。最後に、従来の小型ロケットに代わるロケットを使った新しい宇宙実験システムの構想を紹介してまとめにかえる。

低コストで機動性に優れより多くの研究者に実験機会を提供することが出来る再使用垂直離着陸ロケットシステム構想については既にJAXA等で研究、実験が進められ着実な成果が生み出されている。[3],[4],[5],[11] 従来の使い捨て海上回収型ロケットに対する垂直離着陸型再使用ロケットシステムの優位性の詳細については他報告に譲るとして最大の利点、特徴は打ち上げコストと即時回収性ではないだろうか。

しかしながら、現在研究開発が行われているものは液体水素を燃料とするものが主で、ここではさらなる低コスト化を目指し液化天然ガス(LNG)を燃料とし、民生品と既存技術を融合させた新しい再使用型打ち上げシステムNexLs (Next-generation Launch Service)を紹介する。

NexLsシステムは航空機レベルの容易さで打ち上げ回収を可能にする再使用型垂直離着陸ロケットシステムの提供を目指すもので技術的には既に実証されている。[5] ところが再使用の利点を最大限に生かし、打ち上げ重量あたりのコストを大幅に低減させるには、システム自体の

開発、製作費の低減のみならず燃料、打ち上げ運用コストの低減が不可欠である。液体水素はエンジン性能の観点からは優れているものの、低コストで頻繁な打ち上げ運用サービスを提供するには取り扱いや全体コストの面で必ずしも優位ではない。[7]

表-10 NexLsシステムの目指すもの

1. ペイロード200kg、高度300km約6分の無重量時間(10-4 gレベル)
2. 短期間に複数回繰り返し観測可能の打ち上げ可能
3. 打ち上げ期間の制限がない
4. 自由な飛翔軌道
5. ホバリング可能
6. 衝撃波、打ち上げ加速度の影響が少ない
7. 低コスト(30万円/kg以下をめざす)
8. 0-1g対照実験用小型セントリフュージ搭載予定
9. ロケット本体との共通I/F
10. 最短打ち上げ間隔12時間

そこで著者らは茨城大学や(株)小林製作所ほか高い技術力を有する茨城県の企業数社との共同研究により、さらなる低コスト化を目指し液化天然ガス(LNG)を燃料とし、さらにロケットシステムの開発で最も費用のかかるエンジンの中でも開発要素の高いターボポンプを自動車エンジンの過給器(ターボチャージャ)を使って実現させる研究を始めている。このシステムが完成すれば、これまでとは格段に低コストで頻繁に宇宙実験が出来ることになる。これにより従来ロケットでは統計的に十分な実験試料が得難かったり、繰り返し実験が事実上出来なかった宇宙実験の概念を覆しこれまでの宇宙実験の可能性を一気に広げるだけでなく、得られる科学データの品質を格段に向上させることが出来る。特に実験後即時回収が望まれるライフサイエンス実験に大きく道を開くことが期待される。また打ち上げコストの低減により大学等教育現場への利用、さらにはその他の商業利用にも活用されることが予想される。

本システムは約200kgのペイロードを上空300km程度まで運び、10-4g、6分間の微小重力環境を提供する。また本ロケットは飛行パターンを自由に取ることが出来、打ち上げ時の加速度や途中の飛行経路も事前にプログラムでき、途中上空でのホバリングも可能である。本システムにより従来の海上回収型小型ロケットでは困難であった生物実験にも道を開き、低コストの価値を生かし写真や映画の撮影、CM利用等々広く一般ユーザの各種要求にも答えることが可能となる。[8]

このように小型ロケットによる研究利用、商業利用等の幅広いユーザの要求を満たし宇宙空間への新しい輸送ビジネスを創出するためには、信頼性はもとより再使用型の利点を最大限に生かし全体輸送コストを格段に低減する次世代型再使用垂直離着陸ロケットシステムの実現が不可欠ではないだろうか。

参考文献

- 1) 益田剛志、日本最初の宇宙実験(微小重力実験)用ロケットTT-500A、日本ロケット協会
モノグラフ
- 2) 大澤弘之、柴藤羊二、他、新日本ロケット物語
- 3) http://www.jaxa.jp/press/2003/11/20031112_rvt_j.html
- 4) IAC-05-D2.4.08 A CONCEPT OF A REUSABLE SOUNDING ROCKET
- 5) JAXAプレスリリース2003再使用ロケット実験機 第3次離着陸実験(RVT-9)について
- 6) NASA Report to Congressional Requesters, More Knowledge Needed to Determine Best
Alternatives to Provide Space Station Logistics Support
- 7) http://www.nasda.go.jp/press/2002/05/lng_020508_j.html#5
- 8) 井口洋夫、JAXA、我が国の宇宙実験-成果と教訓、日本マイクログラビティ応用学会誌第22
巻増刊
- 9) http://www.nasda.go.jp/projects/rockets/tr1a/index_j.html
- 10) <http://www4.jsforum.or.jp/public/tebiki/3.html>
- 11) 再使用ロケット科学観測研究会報告、新しい赤道大気科学を拓く再使用ロケット、平成14年
8月