

「宇宙利用を支える宇宙材料劣化研究拠点の形成」の成果について

研究 開発 体制	主管研究機関 研究代表者名	九州工業大学 准教授 岩田 稔	研究 開発 期間	平成26年度～ 平成28年度 (3年間)	研究 開発 規模	予算総額（契約額） 75百万円		
	共同研究機関	神戸大学				1年目	2年目	3年目
						17.3百万円	30.4百万円	27.3百万円

研究開発の背景・全体目標

人工衛星に使われている部材は厳しい宇宙環境に曝されることにより劣化し、その機能を失う。先進的・革新的ミッションを遂行する科学衛星や更なる長寿命化が要求される商用衛星では、材料劣化により人工衛星の機能が失われることがないよう、多岐にわたる宇宙環境要因に対する劣化の影響を評価する必要がある。これらの材料劣化に対する衛星プロジェクトからの要求は年々、高度化・複雑化してきている一方で、宇宙環境要因の影響全てを一括して研究・評価し、衛星プロジェクトからの要請を受け入れながら材料劣化の品質保証ができる研究拠点は国内に存在しないのが現状であった。

本研究開発では、宇宙環境シミュレーション・模擬曝露試験装置・物性評価装置といった技術・設備群を新規導入・強化すると共に、これらを用いた研究開発を通じた地上模擬試験の高度化・衛星プロジェクト支援・材料劣化の専門知識を身につけた人材の育成を行う研究拠点を形成することを目標としている。

研究開発の全体概要と期待される効果

上記の目標を達成するために本研究開発では、①クラスター型地上模擬設備の開発、②宇宙環境予測・模擬試験条件決定支援システムの構築、③地上模擬試験方法の高度化、および④衛星プロジェクト支援と人材育成、について実施した。衛星プロジェクトからの高度かつ複雑な試験要求に応えるために、日本各地に分散する設備を統合することで様々な試験要求に応えることのできる構想を提唱し、従来よりも低予算でありながら機動性と柔軟性・拡張性に富んだ「クラスター型地上模擬試験設備」を構築した。これと宇宙環境予測・模擬試験条件決定支援システムと学術研究による地上模擬試験の高度化に関する知見を合わせることで、ミッションに応じた宇宙環境曝露条件の決定から地上模擬曝露試験・物性評価・改善案の提示まで、衛星プロジェクトのニーズに応じたテーラーメイドの材料劣化評価が可能になる。また本研究拠点から材料劣化の専門知識を身につけた人材を輩出することにより宇宙開発における安全信頼性評価技術の底上げを図ることができ、将来の先進的・革新的ミッションにおける「攻めた」衛星設計に貢献することができる。

「国民との科学・技術対話」の推進に関する取組について

オープンキャンパスなど大学で行われる行事において研究室の展示ブースを出展し、材料劣化研究の重要性について説明する機会を設け、研究開発の意義について理解して頂くよう取り組んでいる。

こんなはずじゃなかった！！

宇宙で材料は必ず劣化します

『宇宙材料劣化研究拠点』にお任せください！

？ 専門家がない？！

？ 試験設備がない！

？ 材料劣化……？
何をどうやったらいいの？

① 「クラスター型地上模擬設備の開発」

実施内容及び主な研究開発成果

(1) 施設間の有機的結合に係る設備整備

人工衛星プロジェクトの材料劣化に対する試験要求は年々高度化・複雑化しており、様々な環境曝露を実施すると共に、多様な物性評価も要求される。このような宇宙環境における材料劣化の評価は、本来は材料を空気に曝すことなく一連の試験を実施しなければならないが、今までは数十億円規模の集約型環境曝露試験設備でしか実現できなかった。またこのような集約型環境曝露試験設備は全てが1つに結合されているため、小回りがきかず、年々高度化・複雑化する試験要求に対する拡張性・柔軟性に乏しいのが現状であった。

このため本研究開発では従来の集約型の巨大設備とは異なり、様々な設備が分散して設置されていることを前提とした「クラスター型」の地上模擬試験設備を構築するため、各施設間を有機的に結合するための可搬型真空チャンバーを開発し、これにより様々な施設間で評価対象サンプルを移動させることにより、拡張性と柔軟性に富み、集約型環境曝露試験設備よりも低予算で実現できるクラスター型地上模擬試験設備を目指した。

クラスター型地上模擬試験設備を実現するためには

- (A) サンプルを真空保持して各施設間に輸送するための可搬型真空チャンバー
- (B) 各施設に対して可搬型真空チャンバーからサンプルを搬入搬出するための接続ポートシステム

が必要となる。このため(A)については24時間以上 10^{-4} Pa以下の真空圧力を維持できる可搬型真空チャンバーを開発し、国内の各施設間の輸送を可能にした。(B)については九州工業大学、神戸大学、および放射線加速器施設の3機関を想定し、可搬型真空チャンバーを接続してサンプルを真空搬入出することができる接続ポートを開発した。これにより3機関の宇宙環境模擬曝露試験設備を有機的に結合し、複合した宇宙環境による材料劣化試験を行うことができる。一方、宇宙環境模擬曝露後の材料物性の測定はその物性評価の特質によっては、真空中その場測定を実施することが困難であったり、サンプルの取り扱いの観点からも常に真空中でのハンドリングが非現実的な場合がある。このため水分・酸素濃度を1ppm以下に維持しながら作業ができる不活性雰囲気グローブボックスを導入し、可搬型真空チャンバーからサンプルを搬入出することによって、多様な物性評価試験やサンプルのハンドリングを可能にした。このグローブボックスを各施設の宇宙環境模擬曝露試験の中継施設として使用したり、内部に物性評価装置を設置して搬入したサンプルの物性を評価することで自由度を高め、今後の高度化・複雑化する衛星プロジェクトの要求に応えることができ、同時に材料劣化に関する学術研究も活性化することができる。



図1-1 各施設に取り付ける接続ポートシステム



図1-2 不活性雰囲気グローブボックス
サンプルのハンドリング・物性測定を容易にしたり、クラスター型地上模擬試験設備の自由度を高めるために使用

① 「クラスター型地上模擬設備の開発」

実施内容及び主な研究開発成果

(2) 宇宙環境模擬設備の強化

宇宙空間には様々な宇宙環境要因があり、地上模擬試験ではこれらに材料を曝露することによって宇宙環境を模擬する必要がある。様々な環境曝露試験ニーズに応えると共に材料劣化に関する学術研究を推進するため、これらの環境曝露試験装置を整備、もしくは既存の設備を強化する必要がある。衛星プロジェクトからの高度化・複雑化する試験要求に応えるために、放射線（電子線・陽子線）、紫外線、原子状酸素、熱サイクルといった環境曝露試験装置を整備する必要がある。本研究開発では現状で不足している設備を新規導入すると共に、既存の設備を強化することでプロジェクト支援と学術研究の促進を図った。

(A) 熱サイクル試験装置

熱サイクル（熱衝撃）試験は不活性雰囲気中で実施することが多いが、真空中で熱サイクルを印加したいという要求も出てくる。本研究開発では低温環境の実現には課題が残るものの、材料レベルの熱サイクル試験を真空中で実施する試験装置を構築した。

(B) 電子線照射試験装置

陽子線や電子線と言った放射線を照射するためには通常、加速器施設などを利用しなければならないが、年間で使用できる日数は限られているため宇宙環境10年分といった高吸収線量の照射はなかなか難しい。このため本研究開発では電子線源を自前の設備として準備することで、必要とされる放射線照射試験の片方をやり尽くせる試験環境を整えた。陽子線照射試験に関しては外部の加速器施設を利用し、電子線と陽子線との劣化の違いを明らかにすることでその影響を評価することとした。図1-4に導入した電子線照射装置を示す。

(C) 紫外線照射試験装置

紫外線照射では真空紫外線（120-200nm）もしくは紫外線（200-400nm）を放射する2種類の光源を用いているが、現有の設備では照射可能な面積が3-4cmφ程度と小さく、照射強度も太陽光強度の3-4倍であり、得られるサンプル数量が少なく照射試験に費やす期間も長期に亘る点が問題であった。本研究開発ではこれらの光源を、照射面積6cmφ、照射強度が太陽光強度の約6倍となるよう強化を図った。これによりプロジェクト支援を効率的に進めることができるようになった。紫外線光源（200-400nm）については光源の光学系の一部を交換することにより照射強度と照射面積を変更することができるので、紫外線劣化に関する学術研究の促進において有用な設備となっている。

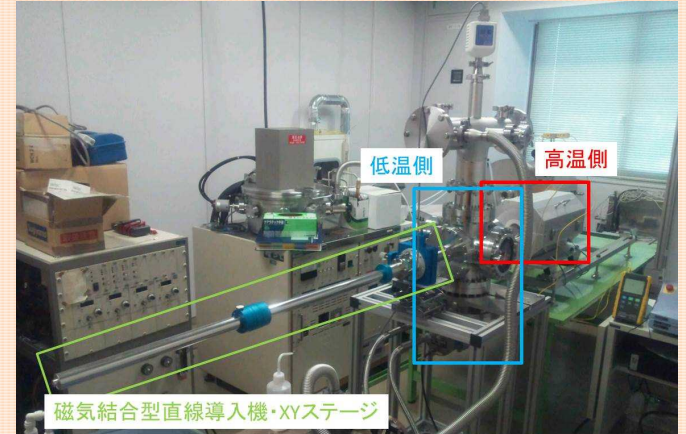


図1-3 真空中熱サイクル試験装置



図1-4 電子線照射装置



図1-5 紫外線照射装置

① 「クラスター型地上模擬設備の開発」

実施内容及び主な研究開発成果

(3) 物性評価設備の高度化

先進的・革新的ミッションを遂行する衛星プロジェクトでは様々な機能性材料が用いられ、これに伴い多様な材料物性の評価が求められる。これらの材料物性評価の全てに最初から応えることは難しいが、通常よく要求される物性として機械特性、電気特性、熱光学特性があり、これらの物性に対して近年しばしば要求される温度依存性について本研究開発により整備を進めた。

(A) 機械特性

引張・曲げなどをはじめとして、様々な機械的物性の測定が必要とされる。この他、近年は先進的・革新的衛星プロジェクトの要求から従来とは異なる機械的物性の評価も人工衛星の安全信頼性確保のために必要とされることから、本研究開発では $-180\sim+320^{\circ}\text{C}$ の温度環境で機械特性の評価が可能な恒温槽と万能試験機を導入し、高度化・複雑化する試験要求に応えられるよう設備を整備した。

(B) 電気特性

材料の絶縁性などの特性に加え、近年は人工衛星の帯電放電現象の観点から、材料の抵抗率・電子放出係数などの物性測定が求められるようになってきた。これらの物性値の温度依存性も帯電放電現象に深くかかわることから、本研究開発では抵抗率の測定装置を導入すると共に、既存の設備で温度依存性の測定が可能になるよう、温度調節サンプルステージを導入し、機能の強化を図った。サンプルの温度は $-150\sim+150^{\circ}\text{C}$ に調節することができ、システムの最適化により、さらなる低温・高温での温度調節が可能と考えられる。この温度調節機構はサンプルホルダーが脱着可能であり、①項の真空搬送機構と組み合わせることによってクラスター型地上模擬試験設備の環境曝露試験装置に温度調節機能を付与することが可能になっている。これによってさまざまな宇宙環境要因と温度環境との相乗効果を評価することが可能になる。

(C) 熱光学特性

熱光学特性と呼ばれる太陽光吸収率と放射率は人工衛星の熱設計において重要な物性値である。特に放射率は温度依存性があることが知られており、先進的・革新的ミッションを遂行する人工衛星においてニーズの高い物性値である。これらの人工衛星では熱制御に様々な機能性材料を用いる動きが活発化しており、指向性・波長選択性などこれまでにない特性があることから、物性評価もこれらの物性を測定する必要性に迫られている。このことから本研究開発では従来の放射率測定装置に $-100\sim+100^{\circ}\text{C}$ で温度依存性を測定する機能を付加し、分光で放射率の温度依存性を測定できる装置を構築した。



図1-6 万能試験機および恒温槽

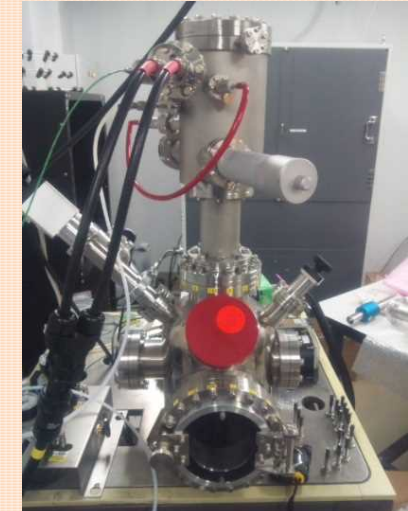


図1-7 温度調節サンプルステージ



図1-8 放射率測定装置に組み込まれた温度依存性測定装置

② 「宇宙環境予測・模擬試験条件決定支援システムの構築」

実施内容及び主な研究開発成果

(1) 宇宙環境予測システムの構築

宇宙環境における材料劣化現象を地上模擬試験で評価するためには、まず宇宙環境において各環境要因が材料に与える影響を知る必要がある。このためには各環境要因が材料に入射する量を知らなければならない。宇宙空間に存在する放射線は幅広いエネルギー範囲に亘っており、降り注ぐ線種も様々である。これらの放射線が降り注いだ時に、材料内部にどのくらいのエネルギー（吸収線量）を付与するかは材料劣化を模擬する上で大変重要な指標となるが、宇宙空間における材料の深さ方向に対する吸収線量分布（以下、深度吸収線量分布）は極めて不均一なものとなるため、これを正確に把握しなければ宇宙環境の材料劣化を正しく模擬し、その影響を評価することはできない。

このため本研究開発では地球周辺の地磁気捕捉荷電粒子放射線は勿論のこと、太陽フレアによる電子線・陽子線・ α 線や、エックス線・ガンマ線なども考慮し、人工衛星の軌道に応じて深度吸収線量分布を算出するシステムを構築した。太陽フレアによる影響は惑星探査を行う衛星などで重要となり、将来の衛星プロジェクト支援で役立つシステムであると考えられる。

(2) 模擬試験条件決定システムの構築

宇宙空間には様々な宇宙環境要因が存在し、様々なエネルギーをもって材料に降り注ぐ。これらの線種は幅広いエネルギー領域に亘っているため、実宇宙空間で生じる不均一な深度吸収線量分布を地上模擬試験により完全に再現することは不可能である。地上模擬試験で放射線照射を実施する場合、基本的に単色のエネルギーによる放射線照射となる。このため実宇宙環境の深度吸収線量分布に沿うようにエネルギーとフルエンスを調整して地上模擬試験を実施することがISOにより定められており、例えば宇宙空間で陽子線によって付与される線量分布は地上模擬試験設備の陽子線照射によって模擬するなどの対応が求められる。

このことから本研究開発では地上模擬試験設備特有の放射線照射による深度吸収線量分布を考慮しながら複数のエネルギー・線種を組み合わせることにより、「(1) 宇宙環境予測システム」にて算出した実宇宙環境における深度吸収線量分布に沿った分布を決定するシステムを構築した。実宇宙環境における深度吸収線量分布と、同分布を模擬するために算出された地上模擬試験設備による深度吸収線量分布との比較を図2-2に示す。この例では3種類のエネルギーの陽子線および2種類のエネルギーの電子線により実宇宙環境の深度吸収線量分布を再現している。

以上の様に実宇宙環境の深度吸収線量分布の算出とこれを再現するための地上試験による深度吸収線量分布の算出を全て1台のパソコンで実現できるシステムを構築した。

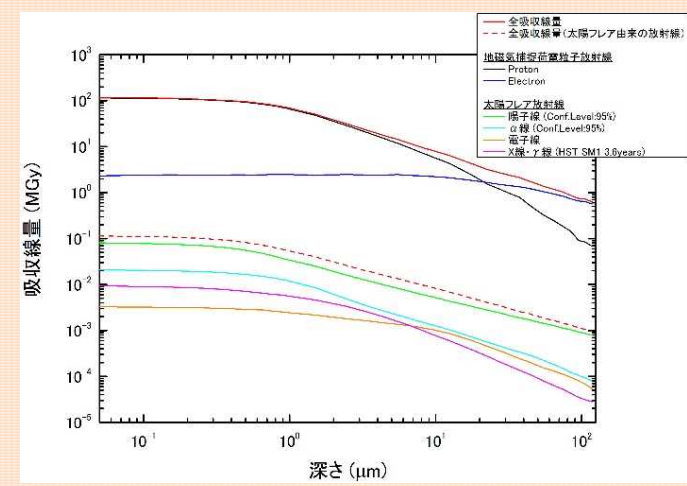


図2-1 宇宙環境予測システムによる深度吸収線量分布

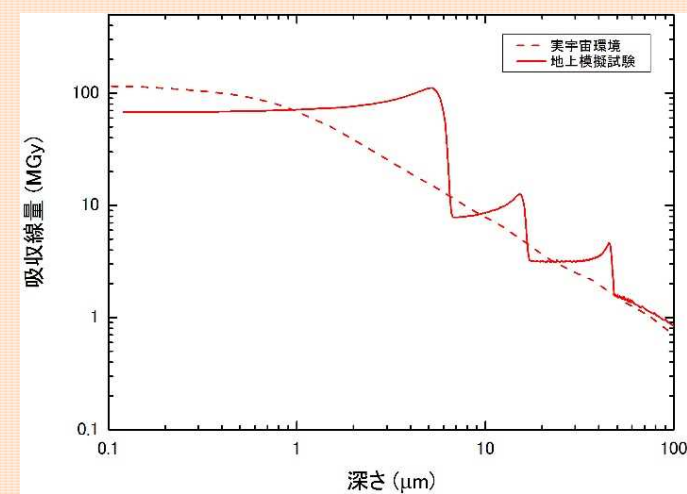


図2-2 模擬試験条件決定システムによる条件決定の例
3種類の陽子線と2種類の電子線で実宇宙環境の深度吸収線量分布を模擬している

③ 「地上模擬試験方法の高度化」

実施内容及び主な研究開発成果

(1) 劣化のエネルギー・波長依存性に関する研究

実宇宙環境の放射線・紫外線を完全に地上設備で模擬することは不可能であり、地上模擬試験では多かれ少なかれ、実宇宙環境と異なる曝露試験により実宇宙環境の劣化を評価しなければならない。このため実宇宙環境と等価な劣化を地上模擬試験により再現するためには、劣化に寄与しないエネルギー・波長を排除し、支配的な要因に着目して地上模擬試験を簡略化した上で劣化の質的同一性を確保するなど、地上模擬試験方法を高度化する必要がある。このため、宇宙環境における様々な放射線・紫外線のうち、要不要のエネルギー・波長を如何にして切り分けるかが地上模擬試験方法の高度化の第一歩となる。

放射線環境は②項で算出したように、実宇宙環境では著しく不均一な深度吸収線量分布となり、人工衛星の軌道によりその分布形状と各線種が影響を与える深さ領域は異なるが、図3-1に示す深度吸収線量分布においては表面近傍では陽子線による影響が顕著であり、材料の深部では高エネルギーの電子線による影響が顕著である。材料の吸収線量に対する劣化の応答性により、実宇宙環境における深度吸収線量分布のどの深さ領域が劣化において支配的な要因となるかを評価した結果、評価する物性によって重要となる深さ方向の吸収線量領域（エネルギー）が異なることが明らかとなった。これらの知見は対象とする材料が放射線に対してどのような劣化応答性を示すかにより異なるため、劣化において支配的な要因は材料毎に異なる、すなわちどの環境要因を無視してよいかは材料毎の見極めが必要であるといえる。またこれらの研究をさらに進めることによって、どの程度地上模擬試験を実宇宙環境に一致させるべきか、についても明確な指標を得ることができると考えられる。地上模擬試験は多かれ少なかれ異なる深度吸収線量分布をもって試験を実施されることになる。この時、どの線種の放射線をいくつのエネルギーのビームを用いて再現するべきかについては知見が得られていないので、本研究開発による手法を用いることによって、地上模擬試験方法を高度化することができる。

紫外線環境は現在、2種類の紫外線光源を用いて模擬するのが一般的であるが、特に波長の短い真空紫外線領域では実宇宙の分光放射強度分布と、紫外線光源の分光放射強度分布とが著しく異なるという問題がある。紫外線照射は放射線とは異なり、実宇宙環境に対する地上模擬試験の加速率が小さいという設備上の制限があり、紫外線光源の違い（波長の違い）による劣化現象の差が顕在化しにくい結果となった。このことから劣化評価の対象となる材料と試験手法を工夫することで図3-2に示すように劣化の波長依存性を顕在化させた上で劣化に支配的な波長を選別し、実宇宙環境の太陽光強度と一致させて2種類の光源を組み合わせるなどの手法により、地上模擬試験方法を高度化することができる。

これらの研究を実験とシミュレーションの両面から更に進めることにより、今後、地上模擬試験方法をより高度なものにしてゆく必要がある。

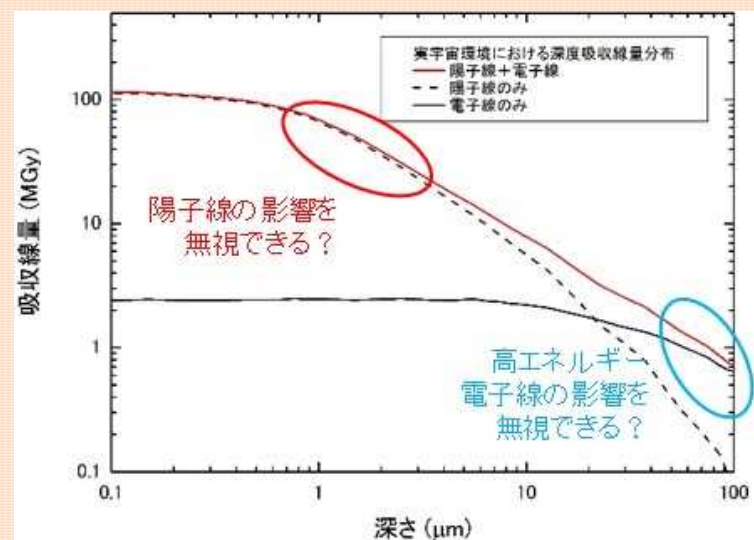


図3-1 放射線による地上模擬試験方法の高度化の概念

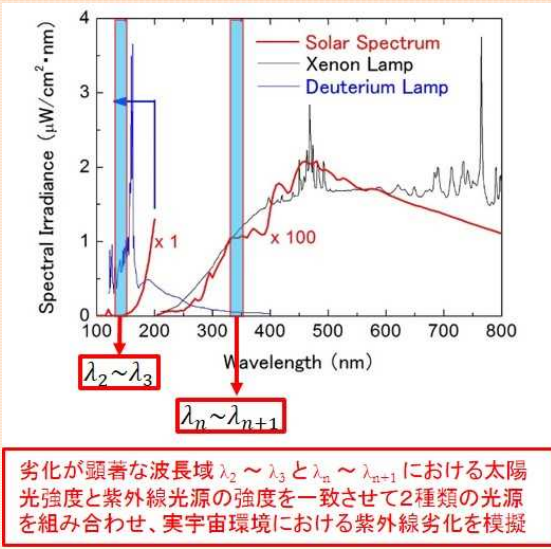


図3-2 紫外線による地上模擬試験方法の高度化の概念

③ 「地上模擬試験方法の高度化」

実施内容及び主な研究開発成果

(2) 原子状酸素の相乗効果に関する研究

多くの宇宙機は高度200~500kmの低地球軌道(LEO: Low Earth Orbit)と呼ばれる領域を周回している。LEOは高真空や紫外線・放射線、不活性分子衝突、原子状酸素などの様々な宇宙環境要因からなる複合環境である事が知られており、これまで多くの軌道上材料試験や地上試験が行われてきた。その結果、以下に示されるようないくつかの知見と問題が得られている。

1. LEO環境での高分子材料劣化の主原因は原子状酸素である
2. 原子状酸素の絶対密度の計測は軌道上試験と地上試験の双方において困難で、ポリイミドの材料劣化量を基準とした相対変化で整理せざるを得ない
3. いくつかの材料において軌道上材料試験と地上試験との間には不整合が生じる
4. 軌道上の原子状酸素劣化に他の環境要因との相乗効果が生じている可能性がある

等である。宇宙材料試験においてはポリイミドが全ての材料劣化試験の比較基準となっており、ポリイミドの劣化特性、特に相乗効果を理解することは、全ての材料劣化試験結果を解析する上で極めて重要になる。特に④に関して、原子状酸素以外の紫外線や中性大気との相乗効果は地球最後のフロンティアとも呼ばれる高度領域である超低高度領域での宇宙機の信頼性確保に極めて重要な技術課題である。そこで本研究開発では紫外線や中性大気との相乗効果について研究を行い、特にこれまで研究例のほとんどないポリイミドの原子状酸素劣化における中性大気との相乗効果について重要な知見が得られた。

原子状酸素と宇宙機表面の相対衝突速度を再現するためのレーザーデトネーションビーム装置を2式用い、宇宙機の軌道速度まで加速した原子状酸素と不活性分子を同時に試料に衝突させて、超低軌道の複合中性ガス環境を地上で再現できる世界唯一のシステムを構築した(図3-3)。本システムを用いて超低高度領域における原子状酸素および中性大気(アルゴンで窒素密度を模擬)の環境を模擬した結果、アルゴンとの同時衝突により原子状酸素によるエロージョンが増加した、すなわち相乗効果により材料劣化が加速されることが明らかとなった。このことからポリイミドにはこれまで知られている紫外線だけではなく、窒素分子やアルゴン分子(あるいはイオン)の高エネルギー衝突によっても相乗効果が発現し、これらの効果を考慮しなければ地上あるいは宇宙実験結果の定量解析結果には大きな誤差が出ること、またフッ素系高分子など、これまでのLEO軌道上試験と地上試験で不整合が生じるとされてきた材料劣化現象を理解する上では、原子状酸素以外の環境因子を十分考慮する必要があること、などが明らかになった。特に「超低高度技術試験機(SLATS)」(図3-4)等、超低高度を周回する衛星は中性ガス密度が極めて高い領域を周回するため、材料劣化予測の不確実性はミッション寿命に直結する問題となり得る。様々な衛星プロジェクトの高度化・複雑化する地上模擬試験ニーズに応えるためにはこれらの相乗効果を加味した高度な地上模擬試験を実施する必要がある。本研究開発で相乗効果のメカニズムを探求し構築した方法を、低軌道宇宙環境に関する相乗効果を加味した高精度な宇宙材料の劣化評価手法として使用することで、地上模擬試験を高度化できる。

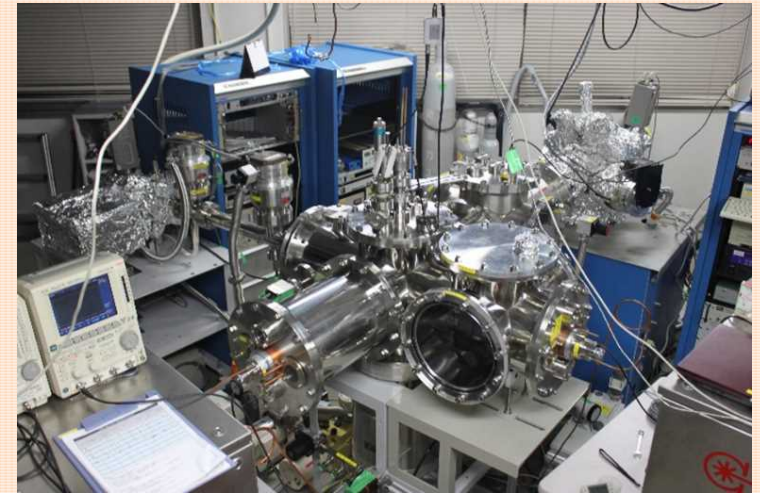


図3-3 レーザーデトネーションビーム装置の外観。本システムは原子状酸素と不活性分子を同時に試料に照射可能な世界唯一の機能を有する。

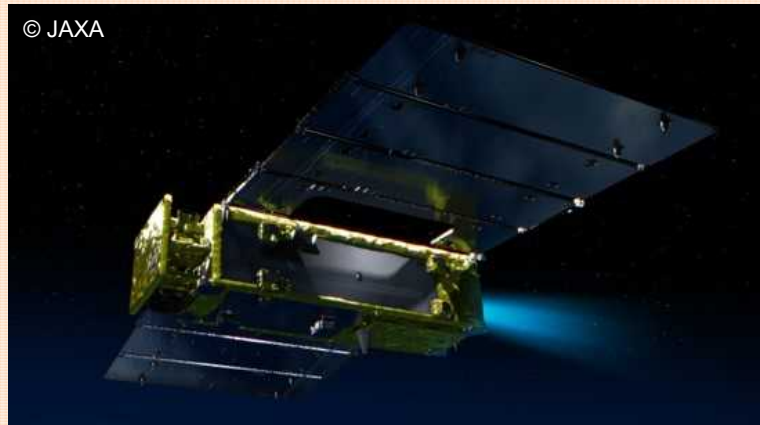


図3-4 超低高度技術試験機(SLATS)

その他の研究開発成果

これまで得られた成果 (特許出願や論文発表数等)	特許出願	査読付き 投稿論文	その他研究発表	実用化事業	プレスリリース・取材対応	展示会出展
		国内 : 0 国際 : 0	国内 : 0 国際 : 0	国内 : 12 国際 : 8	国内 : 0 国際 : 0	国内 : 0 国際 : 0
受賞・表彰リスト						

成果展開の状況について

研究拠点の形成のための様々な研究開発を進める過程で、衛星プロジェクト支援や外部依頼による様々な試験を実施してきた。研究開発期間中の依頼件数は下記の通りである。

- 衛星プロジェクト支援 : 8件 (2017年度 6件)
- その他の試験 : 30件 (2017年度 8件)

特に衛星プロジェクト支援については本研究開発により構築した設備群でなければ対応できない案件もあった。これらの衛星プロジェクト支援およびその他の試験を通じて学術研究と人材育成を推進した結果、宇宙環境劣化に関する専門知識を有する人材を18名輩出することができた。2017年6月現在、12名の学生が材料劣化について学んでいる。

2017年度についても、6件の衛星プロジェクト支援、および8件のその他の試験の依頼があり、研究拠点の成果が順調に展開され、宇宙航空利用に貢献している。

今後の研究開発計画

今後は本研究開発により整備したクラスター型地上模擬試験設備を活用しながら、設備群の改善点を洗い出し、これらを使いこなすことが課題といえる。またクラスター型地上模擬試験設備による学術研究を推進することにより、更なる地上模擬試験技術の高度化を進め、先進的・革新的ミッションを遂行する衛星プロジェクトからの高度化・複雑化する試験要求に応えられるよう常に準備しておく必要がある。このためには衛星プロジェクトのニーズを常に把握しておくことが必要である。研究拠点により得られた成果を積極的に外部に発信し、これに加えてホームページなどを通じた情報発信により研究拠点のプレゼンスを高めると共に、衛星プロジェクトとの繋がりを能動的に形成していくことも研究拠点の維持・発展において重要であり、このための方策を模索することも今後の課題である。これらの活動を通じて人材育成を進め、研究拠点を維持・発展させることが重要である。



学生による地上模擬試験の様子

事後評価票

平成29年3月末現在

1. 課題名 宇宙利用を支える宇宙材料劣化研究拠点の形成
2. 主管実施機関・研究代表者 九州工業大学・岩田 稔
3. 再委託機関 神戸大学
4. 事業期間 平成26年度～平成28年度
5. 総事業費 75百万円
6. 課題の実施結果
(1) 課題の達成状況
「所期の目標に対する達成度」 本課題の目的は、宇宙環境シミュレーション・模擬曝露試験装置・物性評価装置といった技術・設備群を新規導入・強化すると共に、これらを用いた研究開発を通じて地上模擬試験の高度化・衛星プロジェクト支援・材料劣化の専門知識を身につけた人材の育成を行う研究拠点を形成することであった。 同目標を達成するために本課題では、①クラスター型地上模擬設備の開発、②宇宙環境予測・模擬試験条件決定支援システムの構築、③地上模擬試験方法の高度化、および④衛星プロジェクト支援と人材育成、についての取組を実施した。 「①クラスター型地上模擬設備の開発」については電子線照射装置の照射面積が当初より低下したことや、熱サイクル試験装置の最低到達温度といった点に課題が残るが、施設間の有機的結合に係る設備整備において、温調可能なサンプルホルダおよび固定機構を導入したことにより当初の目標を超える機能を達成することができた。 「②宇宙環境予測・模擬試験条件決定支援システムの構築」については、これまで考慮されなかった宇宙環境要因の影響を組み込むことにより、実宇宙環境の深度吸収線量分布とこれを地上模擬試験設備での条件に置き換えるシステムを構築することができ、当初の目標を達成することができた。 「③地上模擬試験方法の高度化」については電気物性に対する劣化のエネルギー・波長依存性に関して課題が残るものの、その他の物性に対しては地上模擬試験方法の高度化の手法を明らかにし、特に原子状酸素との相互作用において、当初目標に含まれなかった中性大気との相互作用についても研究を進めることでこれらの地上模擬試験方法の高度化の手法を明らかにすることができるなど、当初の目標を超える成果を得ることができた。 「④衛星プロジェクト支援と人材育成」については衛星プロジェクト支援およびその他の試験で 38

件（加えて2017年度以降は14件）の依頼があり、人材育成としてこれらの試験を通じて本課題期間中に18名（うち2名は留学生）の専門知識を有する人材を輩出することができた（加えて2017年度以降は12名の学生（うち2名は留学生）が材料劣化について学んでいる）。以上のことを考え合わせて本課題は所期の目標を概ね達成していると言える。

「必要性」

科学的・技術的意義および社会的・経済的意義（産業活動の活性化・高度化、国際競争力の向上）

検討が必要でありながら実施できなかった様々な試験が実施できる。これにより宇宙環境における材料劣化に関する学術研究が活性化されると共に、これらの知見により高度化された地上模擬試験技術によって人工衛星の安全信頼性が高まる点は技術的に意義深い。

またこれらの設備により、国内の材料メーカーや衛星メーカーは宇宙用部品の材料劣化に係る品質保証が可能となり、国際市場に打って出るために必要なアイテムを備えたことになる。本課題によって形成された研究拠点によって、世界市場で判断基準となる材料劣化のデータが得られる点は国内の宇宙産業化を支援する上で極めて必要性が高いと言える。

「有効性」

新しい知の創出および研究開発の質の向上

様々な宇宙環境要因の曝露や物性評価を大気中に曝さずに行う試験は、これまでやりたくても実現できなかった。これらのその場測定の実現や複合環境による相乗効果の研究が進むことによって今までとは異なる新しい知見が得られると共に、様々な試験を複合して実施できる設備環境により研究開発の質が向上する。これらのことから本課題で形成した研究拠点は劣化メカニズムの解明や新規材料開発において新しい道を切り拓く上で有効である。

「効率性」

計画・実施体制の妥当性および費用対効果向上方策の妥当性

本課題により研究拠点を形成するにあたり、従来の集約型の設備とは異なるクラスター型地上模擬試験設備を提唱し、低予算でありながら機動性・柔軟性・拡張性に富む設備群を構築することができた。つまり集約型よりも低い予算で高い機能性を実現できたことは費用対効果向上方策が妥当であったと言える。

計画・実施体制については、本課題の構成メンバーはこれまでに宇宙開発における材料・部品の信頼性に係る長い経験を有しており、このメンバーであったからこそ本課題で実施計画に則した成果が得られたと言える。

（2）成果

「アウトプット」

本課題によるクラスター型地上模擬設備の開発により、これまでに対応できなかった衛星プロジェクトの支援が可能になった。特に本課題期間中に実施した3件の衛星プロジェクトに関しては、「①クラスター型地上模擬試験設備の開発」と「③地上模擬試験方法の高度化」によって得られた設備・技術がなければ支援できないものであり、本課題が目標としていた「先進的・革新的衛星プロジェクトからの高度化・複雑化する試験要求に応え、新規・代替材料の探索・開発も視野に入れながら過大・過小・不適切な材料劣化を是正して適切な設計マージンの担保に貢献し、先進的・革新的ミッションの成立性を不適切に阻害しない衛星設計を可能にする」研究拠点であることを示すものである。

人材育成の面では18名の学生が人工衛星に係わる様々な材料の試験に関与しながら、材料劣化に関するテーマについて研究を進め、材料劣化に関する知識を身につけた。特に3名の学生が衛星プロジェクトおよび衛星プロジェクト支援をテーマとして、環境条件決定から環境曝露試験・物性評価・材料分析・劣化メカニズムの解明・改善策の提案に至るまで一括して自主的に学術研究を行い、材料劣化に関する専門知識を身につけた。このことから本課題が目標としていた人材育成に関して十分な成果が得られたと言える。

「アウトカム」 (平成29年6月末時点)

宇宙材料劣化研究拠点について、学会などで積極的にアピールした結果、研究拠点の設備を用いた高度な衛星プロジェクト支援について依頼があった。2017年6月末現在、衛星プロジェクト支援およびその他の試験で14件の依頼があり、このうち2件は本課題にて導入した設備でなければ支援できない高度な衛星プロジェクト支援であった。以上のことから、本課題により形成した研究拠点は着実にインパクトを与えアウトカムを得ている。

(3) 今後の展望

今後は本課題により形成した研究拠点の設備・成果を衛星プロジェクト支援に活用しながら、クラスター型地上模擬試験設備を使いこなし、利便性を高めると共に常にその機能性の改善を行い、より高度かつ複雑な衛星プロジェクト支援が可能になるよう整備する。これと同時に研究拠点の設備群を用いた学術研究は欠かすことのできない両輪であり、これらを通じた人材育成を進め、学術的知見・高度な地上模擬試験設備および試験技術・専門知識を持った人材の育成、といった様々な側面から先進的・革新的ミッションを遂行する衛星プロジェクトを支え、新規・代替材料の探索・開発も視野に入れながら過大・過小・不適切な材料劣化を是正して適切な設計マージンの担保に貢献し、ミッションの成立性を不適切に阻害しない衛星設計の実現に貢献できるよう日々邁進する。研究拠点で依頼を受けた衛星プロジェクト支援やその他の試験に関しては、拠点構成メンバー間で情報を共有し、適切な資金配分と役割分担を話し合うことにより、有意義な支援ができるように努めており、今後もこれを継続する。

また研究拠点に関するホームページなどを通じた情報発信につとめることにより、更なる研究拠点のプレゼンスの向上を図ると共に、衛星プロジェクト支援および学術研究の成果を積極的に外部発表することで研究拠点の存在を周知し、その利用を促進する予定である。これにより産学連携を進め、国内の宇宙産業化に貢献してゆく予定である。

評価点	
A	<p>評価を以下の5段階評価とする。</p> <p>S) 優れた成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に著しく貢献した。</p> <p>A) 相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献した。</p> <p>B) 相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献しているが、一部の成果は得られておらず、その合理的な理由が説明されていない。</p> <p>C) 一部の成果を挙げているが、宇宙航空利用の明確な促進につながっていない。</p> <p>D) 成果はほとんど得られていない。</p>
評価理由	
<p>研究拠点の形成は設備構築・学術研究・人材育成・プロジェクト支援など概ね計画通り進めることができ、一部では当初計画を超える成果を挙げることができた。研究拠点を活用した衛星プロジェクト支援や人材育成も順調に進み、特に、材料評価の観点からは着実な進展をみせており、一部の衛星プロジェクトでは本課題による成果がなければ試験が困難であったものもあり、これらを遂行できたことで研究拠点は着実に成果を挙げた。また、本課題完了後もホームページなどを通じた情報発信に努めており、研究拠点を利用した学術研究および衛星プロジェクト支援が進められている。</p> <p>以上より、本課題は相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献している。</p> <p>今後は、論文の投稿等、学術的成果創出に取り組むとともに、研究拠点としての継続的な取組、発展を期待する。</p>	