

平成 26 年度「きぼう」利用候補テーマ 一般区分 科学研究テーマ  
「炭素質ナノ粒子の宇宙風化と星間有機物進化の実証研究」

実施計画書

ベースライン版

概要

本文書は、恒星周囲で合成される最も始源的な炭素質ダストの候補物質を実験室で合成し、きぼう実験棟 ExHAM を利用した ISS 軌道上の環境に曝露する事によって、未同定赤外バンドおよび 2175Å の星間減光バンプの担い手を同定しその成因を探ることを目的とした研究候補テーマ「炭素質ナノ粒子の宇宙風化と星間有機物進化の実証研究」の実施計画を記述したものである。

文書番号		QCC20150306
文書承認年月日		2015年03月06日
作成  2015. 03. 07	承認  2015. 03. 07	備考

# 1. 本書の位置づけ

## 1.1. 目的

本文書は、恒星周囲で合成される最も始源的な炭素質ダストの候補物質を実験室で合成し、きぼう実験棟ExHAMを利用したISS軌道上の環境に曝露する事によって、未同定赤外バンドおよび2175Åの星間減光バンプの担い手を同定しその成因を探ることを目的とした研究候補テーマ「炭素質ナノ粒子の宇宙風化と星間有機物進化の実証研究」の実施計画を記述したものである。

## 1.2. 適用範囲

本文書の内容は、平成26年度「きぼう」利用研究テーマ「炭素質ナノ粒子の宇宙風化と星間有機物進化の実証研究」に適用する。

## 1.3. 文書等

### 1.3.1. 参考文献

- (1) JX-ESPC-100847A 汎用宇宙曝露実験用ハンドレール取付機構 (ExHAM) 開発仕様書
- (2) JX-ESPC-101114 汎用宇宙曝露実験用ハンドレール取付機構 (ExHAM) / 実験試料インタフェース管理仕様書

### 1.3.2. 関連文書

- (1) 平成26年度「きぼう」利用 一般募集 科学研究テーマ提案書 テーマ名：「炭素質ナノ粒子の宇宙風化と星間有機物進化の実証研究」
- (2) 平成26年度「きぼう」利用候補テーマ 一般区分 科学研究テーマ炭素質ナノ粒子の宇宙風化と星間有機物進化の実証研究」実験要求書

## 2. 実施体制

### 2.1 代表研究者

所属機関・部署	東京大学・大学院理学系研究科		
住所	東京都文京区本郷7-3-1		
電話	03-5841-4276	FAX	03-5841-7644
研究代表者	フリガナ サコン イツキ	役職	e-mail
	氏名 左近 樹	助教	isakon@astron.s.u-tokyo.ac.jp
	研究項目：炭素質ナノ粒子の宇宙風化と星間有機物進化の実証研究		エフォート 20%
分担内容：研究統括、実験供試体・試料製作の実務、技術安全審査に関する評価試験実務、地上対照試験、物性分析、曝露前後での評価試験全般			

### 2.2 共同研究者

所属機関・部署	東京大学・大学院理学系研究科		
住所	東京都文京区本郷7-3-1		
電話	03-5841-4261	FAX	03-58417644
共同研究者 1	フリガナ オナカ タカシ	役職	e-mail
	氏名 尾中 敬	教授	onaka@astron.s.u-tokyo.ac.jp
	研究項目：炭素質ナノ粒子の宇宙風化と星間有機物進化の実証研究		エフォート 10%
分担内容：実験供試体製作に関する技術的なアドバイス			
所属機関・部署	北海道大学・低温科学研究所		
住所	〒060-0819 北海道札幌市北区北19条西8丁目		
電話	011-706-7666	FAX	
共同研究者 3	フリガナ キムラ ユウキ	役職	e-mail
	氏名 木村 勇気	准教授	ykimura@lowtem.hokudai.ac.jp
	研究項目：炭素質ナノ粒子の宇宙風化と星間有機物進化の実証研究		エフォート 10%
分担内容：試料作成・分析の技術補助			
所属機関・部署	電気通信大学・研究設備センター		
住所	〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1 東六号館135 センター事務室		
電話	042-433-5815	FAX	
共同研究者 4	フリガナ キムラ セイジ	役職	e-mail
	氏名 木村 誠二	研究支援推進員	kimura@cia.uec.ac.jp
	研究項目：炭素質ナノ粒子の宇宙風化と星間有機物進化の実証研究		エフォート 10%
分担内容：試料作成・分析の実務、技術補助			
所属機関・部署	日本大学・理工学部一般教育		
住所	〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1		
電話	047-469-5578	FAX	
共同研究者 5	フリガナ ナカムラ マサト	役職	e-mail
	氏名 中村 正人	教授	mooming@phys.ge.cst.nihon-u.ac.jp
	研究項目：炭素質ナノ粒子の宇宙風化と星間有機物進化の実証研究		エフォート 10%
分担内容：曝露実験データの理論的考察と解釈における補助			

所属機関・部署	JAXA 宇宙科学研究所・宇宙物理学研究系		
住所	〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1		
電話	050-3362-6376	FAX	
共同研究者 6	フリガナ	イチムラ アツシ	役職
	氏名	市村 淳	助教
	e-mail		ichimura@isas.jaxa.jp
	研究項目：炭素質ナノ粒子の宇宙風化と星間有機物進化の実証研究		エフォート 10%
	分担内容：実験データの理論的考察と解釈における補助		

### 2.3 研究協力者

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所学際科学研究系の稲富裕光教授には、搭載機器の安全評価試験に関する技術的アドバイス等の協力を頂いている。海洋研究開発機構 生物地球化学研究分野の小川奈々子 主任技術研究員、大河内直彦 研究分野長（上席研究員）からは、物性分析に関わる研究協力を頂いている。また、和田節子（電気通信大学）より試料合成、分析に関する全般的な協力を頂いている。実験供試体の設計・製作、圧縮試験等においては株式会社エムシステムの門脇 修（技術部技術室）、土川 智弘からの協力を頂いている。東京大学 海外学振特別研究員のMark Hammonds氏には、本曝露実験および地上対照実験結果得られる赤外スペクトルの理論計算に基づく解釈、東京大学 海外学振特別研究員のRonin Wu氏には赤外観測スペクトルとの比較議論に関する協力を得ている。

### 3. 実験概要

#### 3.1 実験テーマの名称（一般向け）

[和文] 炭素質ナノ粒子の宇宙風化と星間有機物進化の実証研究

[英文] Quest for the Compositional identification and Chemical evolutionary understanding of the Interstellar Carbonaceous Solids

#### 3.2 実験テーマの略称（JAXA, 研究チーム内向け）

**QCC (Quest for the Compositional identification and Chemical evolutionary understanding of the Interstellar Carbonaceous Solids)**

#### 3.3 実験概要

[和文]

本研究は、赤外/紫外線分光分析に基づいて星間ダストの組成および化学・物理学特性を同定する為に必要な正確な知識を実験的に得る事を目的とする基礎研究である。AGB星周囲のガス中で凝縮する始源的な炭素質ダストの有力候補の一つである急冷炭化水素物質(QCC)をはじめ、いくつかの実験室で合成した炭素質物質を、国際宇宙ステーションISSのきぼう実験棟ExHAMを利用して1年間宇宙環境に曝露する。その結果、曝露実験前後で我々のサンプルに生じる化学/物理性質の変化を調べることによって、我々の実験室合成サンプルと実際の宇宙環境に存在するダスト粒子を関連づける鍵となる進化の過程を同定する。

[英文]

This research is an experimental investigation aiming to obtain accurate knowledge needed to identify the compositional, chemical and physical properties of interstellar dust based on the infrared/ultraviolet spectroscopic observations. Several laboratory-synthesized carbonaceous compounds including quenched carbonaceous composites (QCCs), which are the candidates of primordial carbonaceous dust condensed in the AGB stellar gas wind, are exposed to cosmic environment at ISS orbit for ~1 year by means of KIBO/ExHAM. By investigating the changes in the chemical/physical properties of our samples between before and after the exposure experiment, we aim to identify the key evolutionary processes that associate our samples with the dust grains in actual astrophysical environment.

#### 3.4 実験目的

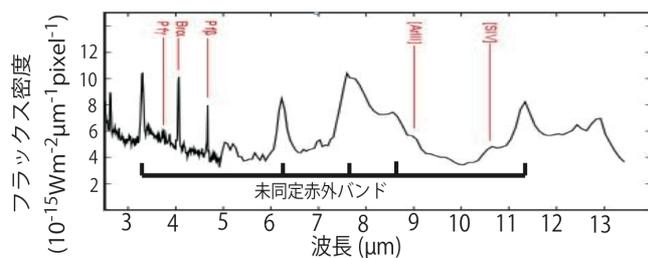
本研究テーマは、1973年の発見以降明確な担い手の同定に至っていない未同定赤外バンドと、同じく未解決の星間減光中の2175Å構造の担い手の同定を目的とするものである。両者と多環式芳香族炭化水素 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) (Duley & Williams 1981; Allamandola et al. 1989)との関連性は、広く議論されているが、どの多環式芳香族炭化水素も赤外スペクトルの特徴や紫外吸収構造の特性が異なり、担い手物質の理解は全く不十分である。未同定赤外バンドの担い手は、主に終焉を迎える中小質量星の恒星風中で凝縮し、その後星周環境を離れて星間環境に至る過程で、紫外線やX線の照射、電子や荷電粒子、高エネルギー粒子との相互作用を経て、宇宙空間に普遍的に観測される未同定赤外バンドを提示するようになると考えられている。物質同定に至らない最大の要因の一つは、晩期型巨星の星周で凝縮する最も初期の炭素質物質を開始物質として、星間空間に拡散されるまでに電磁波、電子、荷電粒子、高エネルギー粒子との相互作用を経て、

普遍的な赤外線特性を示す物質に至る過程が、実験室や理論計算上でうまく扱えなかった事であると考えられる。本研究では、急冷炭素質物質(QCC)や異原子(特に窒素)の混入する炭化水素物質が晩期型巨星の星周で凝縮する最も初期の炭素質物質を模擬するという着想に基づいて、「それらの物質を宇宙環境下での曝露し変性する過程に、普遍的な未同定赤外バンドのキャリアや2175Åの吸収バンド構造の担い手を生む要因がある」という仮説を、「きぼう」実験棟船外簡易取付ExHAMを利用し実験的に検証する。本研究によって、40年来未解決の未同定赤外バンドや2175Åの吸収バンド構造の担い手である炭素質物質の正体とその成因を明確化し、宇宙に於ける最も普遍的かつ基礎的な有機物の誕生の過程を理解することが可能になると期待できる。

### 3.5 実験背景

宇宙空間の固体微粒子(ダスト)は、当初水素とヘリウムだけであった宇宙に恒星が誕生し、恒星内部での元素核合成の結果、星の終焉とともにまき散らされる重元素を原材料として星周空間で形成される。その後、分子雲中に取り込まれ粒子成長を経て、宇宙有機物の化学合成反応に必要な役割を演ずる。さらに、分子雲中に紫外線を放つ星が誕生すると、恒星由来の紫外線や高エネルギー粒子による変性を経験し、やがて星間ダストとして銀河の星間物質の構成メンバーとなる。星間ダストは、赤外観測を通じて、系外銀河の星間物理環境(輻射場強度、星形成量やAGN活動等の銀河の駆動熱源)を知るための有用な道具でもある。1980年台以降、赤外線衛星ミッションの活躍により、宇宙空間のダストの赤外スペクトルの観測データが供給され、ダストの主要メンバーである炭素質ダストと珪酸塩ダストに関わる研究が進展した。

特に、赤外未同定(Unidentified Infrared; UIR)バンドとして知られる顕著な近・中間赤外スペクトル構造(図3.5.1参照)は、主として芳香族炭化水素のC-C結合およびC-H結合に起因するバンドであると理解され、その担い手は多環式芳香族炭化水素(PAH)仮説(Duley & Williams 1981)で一定の理解がなされるようになった。さらに、系内・系外を問わず様々な天体の赤外スペクトルに観測されるため(e. g., Tokunaga 1997, Onaka et al. 1996)、担い手は宇宙空間に普遍的に存在する物質であると考えられており、その赤外スペクトルの顕著さを利用して、遠方銀河の星間物理環境を探る為の道具となる事が強く期待されている。しかしながら、発見から40年経った現在でも、実際に観測されるUIRバンドと、実験室や量子化学計算によって扱えるPAH分子の赤外放射特性との整合性は取れておらず、その担い手の性質の理解は依然として不十分である。我が国では、電気通信大学の坂田氏らによって、メタンガスをプラズマ化した後急冷して合成に成功した急冷炭素質物質(QCC; Sakata et al. 1983, Nature, 301, 493)とUIRバンドの担い手の関連性を探る試みがなされてきた。最近では、芳香族脂肪族混合有機物ナノ粒子(Kwok & Zhang 2011)などの、窒素等の異質原子を含む複雑な有機物物質による解釈も提案されている。ひとたび、Spitzer 宇宙望遠鏡や赤外線天文衛星「あかり」の登場により未同定赤外バンドの観測データが大量に供給されるようになった現在、物質同定作業や生成・変性過程の理論的或いは実験的な理解が未熟なまま、観測データの解釈を先行する状況が続いている。従って、UIRバンドの、「より適切な担い手」の素性を実験的に明らかにし、その担い手が様々な星周及び星間環境下においてどのような化学的・物理的応答を見せるかを、実験室天文学と量子化学理論計算に基づく研究に基づいて理解する事が急務である。



あかり衛星近中間赤外線カメラが捉えた、大マゼラン雲内の星形成領域の近・中間赤外スペクトル。顕著な未同定赤外バンド (3.3 $\mu\text{m}$ , 6.2 $\mu\text{m}$ , 7.7 $\mu\text{m}$ , 8.6 $\mu\text{m}$ , 11.2 $\mu\text{m}$  など) が見られる。

図3. 5. 1：観測される未同定赤外バンドのスペクトルの一例。

同様に、星間減光曲線中に見られる2175Åバンプ構造 (Stecher 1965) についても、その担い手は未同定赤外バンドの担い手との関連が議論されるが、発見後50年近く経過した現在でも決定的な物質同定には至っていない。グラファイト (Stecher & Donn 1965) をはじめ、水素化アモルファスカーボンナノ粒子 (HAC; Schnaiter et al. 1998)、グラファイト化したHAC (Blanco et al. 1999)、芳香族炭化水素 (PAH; Joblin et al. 1992; Duley & Seahra 1998)、carbon buckyonions (Li et al. 2008) などがその担い手として提案され、中でも電気通信大学の坂田氏らによって提案された急冷炭素質物質 (QCC; Sakata et al. 1983) は、合成過程の観点から晩期型巨星の星周空間で凝縮する始源的炭素質を模擬する物質であると同時に、特に2175Åバンプ構造の担い手、および未同定赤外バンドの担い手と強い関連性を持つ物質であることが指摘されている (図3. 5. 2参照)。QCCは、図3. 5. 3aの電子顕微鏡画像で示すように、やや崩れた炭素骨格構造が含まれた粒子であり、図3. 5. 3bに示すアモルファスカーボン粒子や図3. 5. 3cに示すグラファイト粒子とは異なる炭素構造状態を持つ。

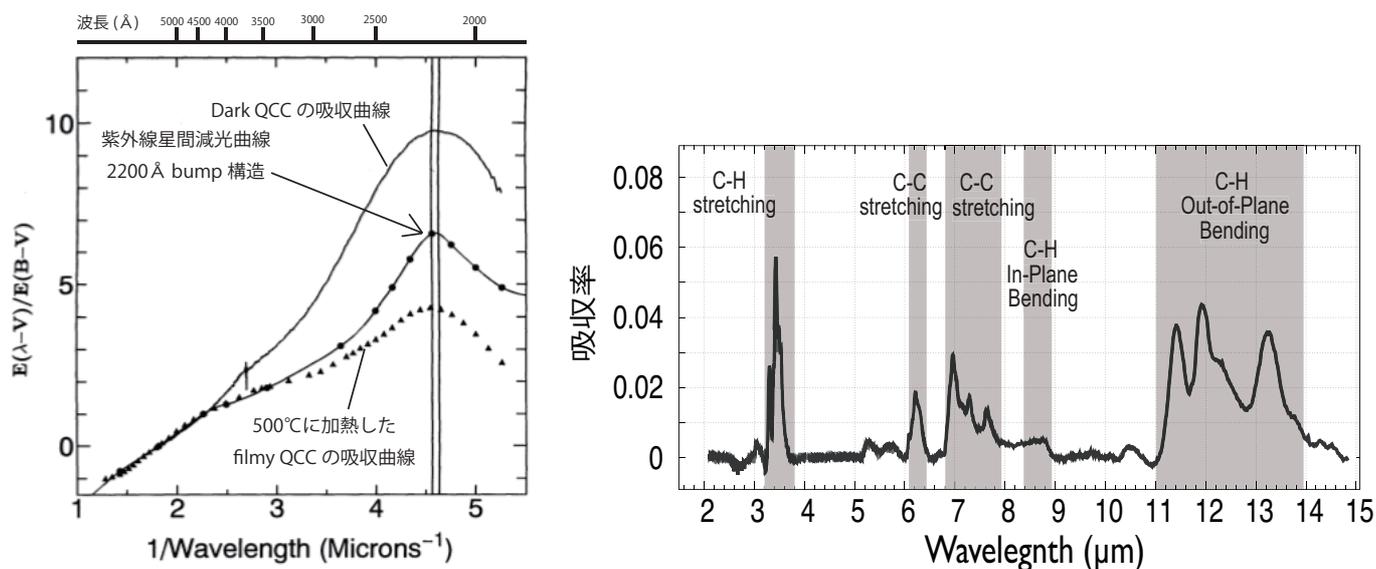


図3. 5. 2：(左) Savage & Mathis (1979) で報告された平均的な紫外線星間減光曲線と、合成したfilmy-QCCを500°Cに加熱処理した粒子およびDark-QCCの吸収曲線。両者の吸収構造と2200Åのbump 構造の類似性が指摘される (Sakata et al. 1995)。

(右) 2.45GHz高周波電源プラズマ反応装置 (Sakata et al. 1983) を用いて、合成したfilmy QCCの赤外吸収スペクトル。未同定赤外バンドとの類似性から、その担い手との関連性が指摘されるようになった。

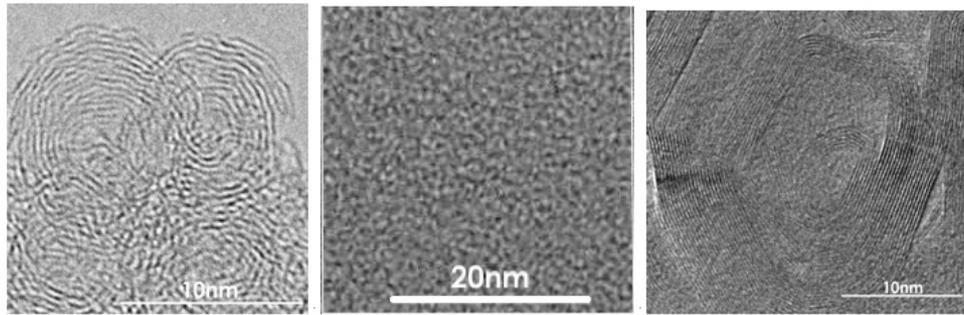


図3.5.3：(左) 図1の装置で合成された Dark-QCCの電子顕微鏡画像(Wada et al. 1999)。(中)アモルファスカーボン(Koike et al. 1995)の電顕画像 (右) グラファイト粒子(電気通信大学で作製)の電顕画像。

我々は、これまでにIRTS(Murakami et al. 1996)や「あかり」衛星(Murakami, et al. 2007)を用いて、様々な天体物理環境下でUIRバンドがどのような応答を示すかの観測的研究を行って来た(Sakon et al 2004; Sakon et al. 2007; Mori et al. 2012)。さらに、星周空間で形成される始源的炭素質物質を模擬すると考えられる急冷炭素質物質 (Quenched Carbonaceous Composite; QCC) (Sakata et al. 1983)の合成・変性実験(図3.5.4参照)や、PAHを用いた窒素含有炭素質物質の合成・変性実験(図3.5.5参照)を進めた結果、「晩期型巨星の星周空間で形成された始源的炭素質物質が、星周輻射場環境で被る変質過程の理解に、宇宙空間に存在する真のUIRバンドの担い手を同定するための鍵がある」という着想に至った。実際に、最近の赤外線観測からは、温度が比較的高い(5000-6000度以上)中心星の星周環境では一般的な特徴を持つ未同定赤外バンドの放射が見られる一方で、中心星温度の低い天体からはaliphatic/aromaticの高い性質を持ったHydrogenated Amorphous Carbon (HAC)の特徴と合致する赤外放射が観測される事が指摘されている(Sloan et al. 2007)。低温星の星周環境では星からの輻射場による過酷な変性を経験していないために、始源的な炭素質物質の性質が残ると考えれば、HACが始源的な炭素質物質と類する性質を持ち、それらが星周輻射場環境を経る事で一般的な特徴を持つ未同定赤外バンドの担い手に変性するという進化シナリオが提案される。また、最近宇宙空間で発見されたフラーレンC60(Cami et al. 2010)の起源を考える上でも、HACのような始源的な炭素質物質が、星周環境での光化学進化(photochemical processing)を経て、C60やPAH等の有機物分子を供給する進化パスが提案されている(Garcia-Hernandez et al. 2011)。

こうした観測結果を考慮すれば、未同定赤外バンドの担い手の同定を狙う上で、星周環境で作られる始源的炭素質物質を模擬する試料(すなわちQCCやHAC)を実験室で準備し、各候補物質に対して宇宙環境下で被る物理・化学変性を施し、回収された物質の赤外分光特性と星間空間中で観測されるUIRバンドとの類似性を評価することが、有効であると結論できる。しかしながら、特に後者の変性過程を探る目的では、地上実験室で扱う事の出来る条件(密度やエネルギー範囲、継続時間)は限定的であり、さらに、実験室では、例えば、X線や紫外線による電子状態の変性とイオン衝突による分子構造の物理的変性などを複合的に作用させる事が難しく、そうした問題点が実験室で扱う物質と宇宙空間で変性を経験する星間ダストとの直接比較を難解にする。そこで、本研究課題では、始源的な炭素質物質の候補試料を実験室で合成・準備し、きぼう実験棟船外簡易取付ExHAMを利用して、試料を太陽近傍の高エネルギーの光子や荷電粒子に曝露させる実験を提案する。

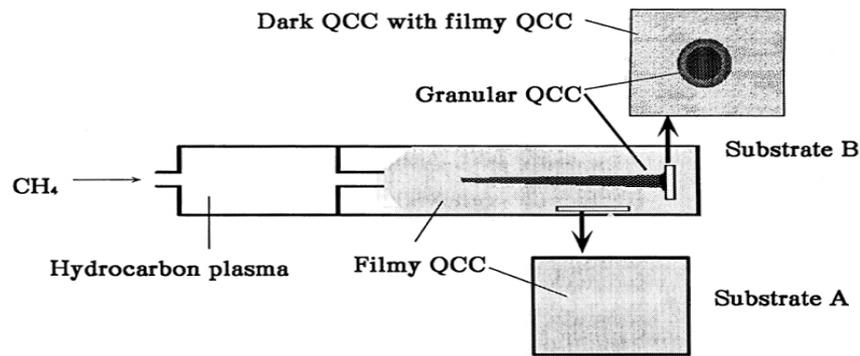
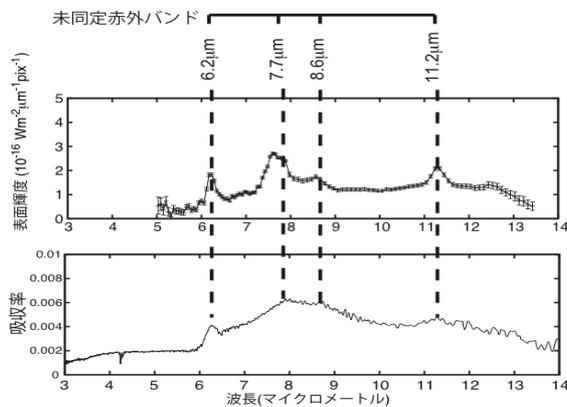


図3.5.4：2.45GHz高周波電源プラズマ反応装置によるQCC合成の概略図。(Sakata et al.1995より抜粋)。噴射口に対して側面に設置した石英基板上で採取されるFilmy QCCはPAHや比較的分子量の小さな揮発性分子を含む粒子であり曝露試料の一つとする。また、噴出口に対して正面に設置した基板上では、Granular QCC及びDark QCCが回収され、これらも曝露試料に用いる。



「あかり」衛星の取得した天の川銀河の銀河拡散光スペクトル中に見られる未同定赤外バンド(上図)、コロナ試料を窒素ガスプラズマ(2torr, 電源出力 300W, 処理時間 150 秒)で処理して得られた残留物を、ATR 赤外分光測定した結果得られた赤外吸収率波長特性(下図)。

図3.5.5：2.45GHz高周波電源プラズマ反応装置(Sakata et al. 1983)を用いて、PAHの一種であるコロネンを石英板上に付着させた試料に窒素プラズマを処理させて窒素含有炭素質物質を合成する予備実験を行った。得られた窒素含有炭素質物質の赤外線吸収率スペクトルを測定した所、実際に観測される未同定赤外バンドとバンド幅や形状等が酷似した赤外スペクトルが得られる事が分かった。但し、ピーク波長位置は、一般的な未同定赤外バンドに比べて長波長側にシフトしており、Class Cの未同定赤外バンドの特徴に近いことから、HACと同様に、未同定赤外バンドの担い手の同定を行う上で、始源的な炭素質物質候補の一つに選定した。

急冷炭素質物質(QCC)は、電気通信大学で坂田朗および和田節子らが、合成に成功した炭素質物質である。プラズマ状態の炭素と水素を急冷して合成する手法(図4参照)は、恒星周囲での質量放出ガス中での炭素質固体微粒子の形成を模擬する点で、QCCは恒星周囲で凝縮する始源的炭素質物質の候補として極めてユニークな物質である。特に、実験生成物のうち、Dark QCCはSavage & Mathis (1979)で報告された平均的な紫外線星間減光曲線に見られる2200Åのバンプ構造を波長位置の観点から極めて良く再現し、Filmy QCCは500°Cの加熱変性を経る事で同様に星間減光曲線の2200Åのバンプ構造の分光特性を再現する物質になると同時に未同定赤外バンドの特徴を良く再現することが示されている。従って、Filmy QCCおよびDark QCC共に、未同定赤外バンドの担い手の同定を考える上で、始源的炭素質物質の候補として、曝露試料に選定する。

また、同装置を用いて、コロネン(C<sub>24</sub>H<sub>12</sub>)等の多環式芳香族炭化水素分子に窒素プラズマを照射させる実験からは、未同定赤外バンドと類似した赤外分光特性を示す窒素含有炭素質物質が回収された(図2.5.5参照)。但し、各バンド放射のピーク波長位置は、星形成領域や銀河拡散光中に見られる一般的な未同定赤外バンドに比べて、長波長側の値を示し、Class Cの未同定赤外バンド(Sloan et al. 2007)に近い特徴を示す事が分かった。Class Cの未同定赤外バンドは、熱源として低温の中心星を有する星周環境にのみ観測される特殊なスペクトルであり、過酷な輻射環境下での変性を経験していない物質が担うと考えられている(Sloan et al. 2007; Peeters et al. 2002; van Dienenhoven et al. 2004)。Class Cの未同定赤外バンドの担い手は、いずれ星周空間、星間空間での輻射場に晒されて、観測される未同定赤外バンドの大多数を占めるClass AまたはClass Bの未同定赤外バンドの担い手に至ると考えられる。Class Cの未同定赤外バンドのキャリアとして、HACが提案されているが(Sloan et al. 2007)、Class Cの未同定赤外バンドと酷似した赤外線分光特性を示す窒素含有炭素質物質も、未同定赤外バンドの担い手の同定を考える上で、始源的炭素質の候補であると判断し、曝露試料に選定する。

この他、主要な始源的炭素質物質候補のHACの一種として、Hydrogen-Containing Diamond Like Carbon(H-DLC, a-C:H)や実験室で合成したHydrogenated Amorphous Carbonも試料に選定する。

これらの物質を含め、本実験で扱う曝露試料は、曝露実験を経て、未同定赤外バンドの真の担い手物質の同定(あるいは鍵となる物質変性の同定)に至るポテンシャルを持つ始源的炭素質物質のうち、現在の我々の知識で考えられる主要な物質をカバーする。曝露試料詳細は、4.3.1節に記載する。

### 3.6 軌道上実験の概要

表4.3.1に記す43種類の試料を合計128スロットの試料スペースを備える試料ホルダーにインストールし、試料ホルダー一台と併せて実験供試体EE64(個数2個;取り付け予定位置はUおよびV)とする。船外簡易取付機構(ExHAM)を用いて、実験供試体の試料面を国際宇宙ステーション軌道上の環境に約1年間曝露した後、地上に回収し、表6.2に記す評価試験を行い、回収試料と非曝露試料間での各評価試験項目の比較を行う。なお、図3.6.1には実験供試体をExHAMに装着した際(2014年11月6日に実施した試料ホルダーのExHAM2号機への適合性確認試験)の様子を示す。さらに、表7.2に記す地上対照実験を実施し、曝露実験前後での変性主要因を解釈する為の参考情報を得る。

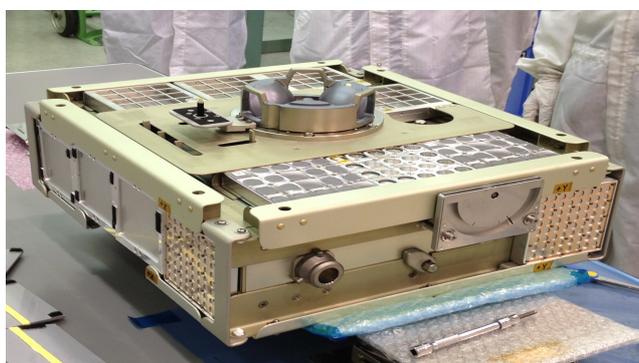


図3.6.1: 2014年11月6日にKHI岐阜工場で行った、実験供試体EE64-IおよびEE64-IIフライト品のExHAM 2号機との適合性確認(フィットチェック)の様子。実験供試体には、フライト品試料の汚染を防ぐ目的で、試料を未搭載で適合性確認を実施した。

### 3.7 実験実施上の特記事項

実験供試体は約1年間の宇宙曝露期間の後に地上回収し、上述の特性変化を定量的に捉えることが必要である。よって、本提案実験テーマは、供試体を長期間宇宙空間に曝露し、かつ、地上に供試体を回収することが出来ない場合は研究成果が得られない。

### 3.8 参考文献

- Allamandola, L. J., et al. 1989, *ApJS*, 71, 733  
Blanco, A., et al. 1999, *Adv. Sp. Res.*, 24, 443  
Cami, J., et al. 2010, *Science*, 329, 1180  
Duley, W. W. & Seahra, S., 1998, *Astrophys. J.*, 507, 874  
Duley, W. W., & Williams, D. A., 1981, *MNRAS*, 196, 269  
Garcia-Hernandez et al. 2011, *ApJL*, 737, L30  
Joblin, C., Leger, A., Martin, P., 1992, *Astrophys. J.*, 393, 79  
Koike, C., et al. 1995, *Astrophys. J.*, 446, 902  
Kwok, S., & Zhang, Y., 2011, *Nature*, 479, 80  
Li, A., et al. 2008, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 390, 39  
Mori, T., Sakon, I., Onaka, T., et al. 2012, *ApJ*, 744, 68  
Murakami, H., et al. 1996, *PASJ*, 48, L41  
Murakami, H., et al. 2007, *PASJ*, 59, S369  
Onaka, T., Yamamura, I., Tanabe, T., Roellig, T. L., & Yuen, L. 1996, *PASJ*, 48, L59  
Peeters, E., et al. 2002, *A&A*, 390, 1089  
Sakata, A., Wada, S., Okutsu, Y., et al., 1983, *Nature*, 301, 493  
Sakata, A., Wada, S., Tokunaga, A. T., Narisawa, T., 1995, *Planet. Space Sci.* 43, 1223  
Sakon, I., Onaka, T., et al. 2004, *ApJ*, 609, 203  
Sakon, I., Onaka, T., et al. 2007, *PASJ*, S59, 483  
Savage, B. D. & Mathis, J. S., 1979, *A. Rev. Astrophys. J. Lett.*, 17, 73  
Schnaiter, M., Mutschke, H., Dorschner, J., Heening, Th., Salama, F., 1998, *ApJ*, 498, 486  
Sloan, G. C. et al. 2007, *ApJ*, 664, 1144  
Stecher, T. P., 1965, *Astrophys. J.*, 142, 1683  
Stecher, T. P. & Donn, B., 1965, *Astrophys. J.*, 142, 1681  
Tokunaga, A. T. 1997, *ASP Conf. Ser.* 124, *DiAuse Infrared Radiation and the IRTS*,  
ed. H. Okuda, T. Matsumoto, & T. L. Roellig (San Francisco: ASP), 149  
van Dienenhoven et al. 2004, *ApJ*, 611, 928  
Wada, S., Kaito, C., Kimura, S., Ono, H., Tokunaga, A. T., 1999, *A&A*, 345, 259-264

## 4. 実験装置、実験試料及び器具等

### 4.1 共通実験装置

共通実験装置として、表4.1に示す船外簡易取付機構 (ExHAM) を使用する。搭載位置等は個別ICDで既定する。

表4.1 共通実験装置

装置名称	インターフェース温度 (°C)	要求事項等
船外簡易取付機構 (ExHAM)	-94°C以上80°C以下	1年間の船外曝露

### 4.2 使用者準備機材

輸送された供試体は表4.2に示すシールバックに封入した状態で、与圧部内に常温保管できる。シールバックは過去の類似プロジェクトで使用/選定実績のある物を選定し、実験側が準備する。なお、輸送容器としてはバブルラップバッグに類する物を想定する。

表4.2 器具類

器具類名称	数量	使用条件・要求仕様等
OC/MCバッグ	4	中に封入する実験供試体(保護蓋は装着状態)に対して吸湿および脱酸素性能を有すること。各実験供試体に対して往路で用いるものに加えて、未開封の復路で用いるものを用意する。
シールバック	2	OC/MCバッグに封入した実験供試体(保護蓋を装着状態)が1個収納できること。各実験供試体に対して <b>往路で用いたものを曝露中船内で保管し、復路で再利用する。</b>
輸送容器(バブルラップバッグ)	2	輸送時の衝撃緩和を目的とする。実験供試体と乾燥剤が入った往路用のシールバックとともに、回収用の空のシールバックも収納できること。輸送容器は回収でも使用する。

### 4.3 実験供試体 (EE64-IおよびEE64-II)

実験供試体はExHAMの曝露ニカ所に装着できるよう二個準備する。各実験供試体は64個(合計128個)の試料スロットを有し、試料スロット番号を下記に示す。

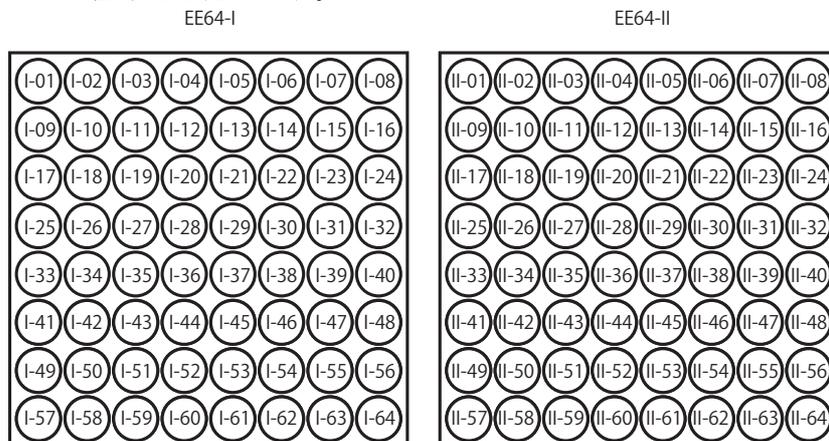


図 4.3.1 : 2個の実験供試体 (EE64-I および EE64-II) の試料スロット番号

#### 4.3.1 実験試料

実験試料の分類、試料数量(最大時)、試料スロット上でのID等の情報を表4.3.1に示す。

表4.3.1 実験試料(2014年11月21日版)

Sample ID	Samples	Maximum # of samples	Slot ID (EE64-I)	Slot ID (EE64-II)
(A-1)	Filmy Quenched Carbonaceous Composite (produced at U Tokyo; Sakata et al. 1983)	12	(Si) I-01, I-08, I-47 (SiO <sub>2</sub> ) I-02 (Si+Cover) I-31 (SiO <sub>2</sub> +Cover) I-56	(Si) II-01, I-08, II-47 (SiO <sub>2</sub> ) II-02 (Si+Cover)II-31 (SiO <sub>2</sub> +Cover)II-56
(A-2)	Deuterated Filmy Quenched Carbonaceous Composite (produced at U Tokyo)	4	(Si) - (SiO <sub>2</sub> ) -	(Si) - (SiO <sub>2</sub> +Cover) -
(B-1)	Dark Quenched Carbonaceous Composite (produced at U Tokyo; Sakata et al. 1983)	8	(Si) I-03, I-64 (SiO <sub>2</sub> ) I-04	(Si) II-03, II-64 (SiO <sub>2</sub> ) II-04
(C-1)	Nitrogen-Containing Carbonaceous Compounds-1 (produced from Coronene C <sub>24</sub> H <sub>12</sub> at U Tokyo)	8	(Si) I-20, I-28, I-29, I-63	(Si) II-20, II-28, II-29, II-63
(C-2)	Nitrogen-Containing Carbonaceous Compounds-2 (produced from Anthracene C <sub>14</sub> H <sub>10</sub> at U Tokyo)	4	(Si) I-52 (SiO <sub>2</sub> ) -	(Si) II-52 (SiO <sub>2</sub> ) II-19
(C-3)	Nitrogen-Containing Carbonaceous Compounds-3 (produced from Chrysene C <sub>18</sub> H <sub>12</sub> at U Tokyo)	4	(Si) I-30, I-60	(Si) II-30, II-60
(C-4)	Nitrogen-Containing Carbonaceous Compounds-4 (produced from C <sub>60</sub> at U Tokyo)	4	(Si) I-55	(Si) II-55
(D-1)	Organic Globule (produced at Hokkaido University)	4	(Si) I-17 (SiO <sub>2</sub> ) I-18	(Si) II-17 (SiO <sub>2</sub> ) II-18
(D-2)	Organics on graphite by FT reaction (produced at Hokkaido University)	4	(Si) I-25 (SiO <sub>2</sub> ) I-26	(Si) II-25 (SiO <sub>2</sub> ) II-26
(D-3)	Organics on silicate by FT reaction (produced at Hokkaido University)	4	(Si) -- (SiO <sub>2</sub> ) --	(Si) --- (SiO <sub>2</sub> ) ---
(E-1)	Onion-like Carbon (Hokkaido University)	4	(Si) I-41 (SiO <sub>2</sub> ) I-42	(Si) II-41 (SiO <sub>2</sub> ) II-42
(E-2)	Giant Fullerene (produced at Hokkaido University)	4	(Si) I-33 (SiO <sub>2</sub> ) I-34	(Si) II-33 (SiO <sub>2</sub> ) II-34
(F-1)	Hydrogenated Amorphous Carbon (produced at University of Electro-Communications Tokyo)	4	(Si) I-43 (SiO <sub>2</sub> ) I-19	(Si) II-43 (SiO <sub>2</sub> +Cover) II-44
(G-1)	Hydrogen-Containing Diamond-like Carbon-1 (Interface Inc.)	4	(Si) I-54 (SiO <sub>2</sub> ) I-36	(Si) II-54 (SiO <sub>2</sub> ) II-36
(G-2)	Hydrogen-Containing Diamond-like Carbon-2 (a-C:H) (NIPPON ITF, INC.)	4	(Si) I-10, I-62	(Si) II-10, II-62
(H-1)	Diamond-like Carbon-1 (ta-CX) (Interface Inc.)	4	(Si) I-51 (SiO <sub>2</sub> ) I-27	(Si) II-51 (SiO <sub>2</sub> ) II-27
(H-2)	Diamond-like Carbon-2 (GLC) (Interface Inc.)	4	(Si) I-59 (SiO <sub>2</sub> ) I-35	(Si) II-59 (SiO <sub>2</sub> ) I-35
(J-1)	Graphite (natural stone; Mexico)	2	(bulk) I-46	(bulk) II-46
(J-2)	Graphite (synthetic compound)	2	(bulk) -	(bulk) -
(J-3)	Graphite (pyrolytic graphite C/A; Tomoe Engineering Co., Ltd.)	4	(bulk) -	(bulk) -
(L-1)	Anthracite (natural stone; USA)	2	(bulk) I-48	(bulk) II-48
(M-1)	Mesophase Carbon-1 (sintered body)	2	(bulk) I-53	(bulk) II-53
(M-2)	Mesophase Carbon-2 (Asahi Coke Ltd.)	2	(bulk) I-61	(bulk) II-61
(P-1)	Polyethylene-1	2	(bulk) I-49	(bulk) I-49

	(Aldrich Chem.; mp 130-145°C)			
(P-2)	Polyethylene-2 (Sumitomo Seika; LE-1080)	2	(bulk) I-57	(bulk) ---
(P-3)	Polyethylene-3 (University of Tokyo)	2	(bulk) ---	(bulk) II-57
(Q-1)	Polystyrene-1 (white)	2	(bulk) I-58	(bulk) ---
(Q-2)	Polystyrene-2 (clear)	2	(bulk) ---	(bulk) II-58
(R-1)	Coronene (C <sub>24</sub> H <sub>12</sub> )	4	(Si) I-06 (SiO <sub>2</sub> ) I-38	(Si) II-06 (SiO <sub>2</sub> ) II-38
(R-2)	Anthracene (C <sub>14</sub> H <sub>10</sub> )	2	(Si) I-14	(Si) II-14
(R-3)	Chrysene (C <sub>18</sub> H <sub>12</sub> )	4	(Si) I-22 (SiO <sub>2</sub> ) I-21	(Si) II-22 (SiO <sub>2</sub> ) II-21
(R-4)	Fullerene (C <sub>60</sub> )	4	(Si) I-05 (SiO <sub>2</sub> ) I-37	(Si) II-05 (SiO <sub>2</sub> ) II-37
(R-5)	Glycolaldehyde dimer	2	(Si) I-24	(Si) II-24
(S-1)	Amorphous Alumina (Hokkaido University)	2	(Si) I-23	(Si) II-23
(T-1)	Calcium Aluminate Hydrate (Hokkaido University)	2	(bulk) I-15	(bulk) II-15
(T-2)	Calcium Silicate Hydrate (Hokkaido University)	2	(bulk) I-16	(bulk) II-16
(U-1)	Olivine (Mg <sub>x</sub> Fe <sub>2-x</sub> SiO <sub>4</sub> ; x=1.8) (natural stone; Pakistan)	2	(bulk) I-09	(bulk) II-09
(U-2)	Olivine (Mg <sub>x</sub> Fe <sub>2-x</sub> SiO <sub>4</sub> ; x=1.5) (natural stone; Miyake Island, Tokyo)	2	(bulk) I-45	(bulk) II-45
(V-1)	Pyroxene (Mg <sub>x</sub> Fe <sub>2-x</sub> (SiO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ; x=1.0) (natural stone; Tanzania)	2	(bulk) I-11	(bulk) II-11
(V-2)	Pyroxene (Mg <sub>x</sub> Fe <sub>2-x</sub> (SiO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ; x=1.8) (natural stone; Koike et al.)	2	(bulk) I-12	(bulk) II-12
(V-3)	Peridotite (natural stone; Ibaraki)	2	(bulk) I-13	(bulk) II-13
(W-1)	Amorphous Silicate (KANTO CHEMICAL Co., INC)	2	(bulk) I-40	(bulk) II-40
(W-2)	Hydrogen-bearing SiO <sub>2</sub> (SiO <sub>2</sub> ·H) (Chihara et al.)	2	(bulk) I-39	(bulk) II-39
(X-1)	Silicon substrate	2	(bulk) I-07, I-32	(bulk) II-07, I-32
(Y-1)	SiO <sub>2</sub> substrate	2	(bulk) I-44, I-50	(bulk) II-50

実験試料のうち、合成石英基板上に堆積させる試料は、紫外光の分光測定の評価の目的で搭載し、シリコン基板上に堆積させる試料は、その他の測定項目(赤外線分光、XPS、UPS、ラマン分光、電子顕微鏡観察など)の用途の目的で搭載する。試料の選定は、2014年9月下旬に実施するPM振動試験による剥離等の調査、2014年9月下旬に実施する試料片加圧試験、2014年10月上旬にJAXAの真空複合環境試験設備を用いて実施する原子状酸素等の腐食程度の調査等の結果を踏まえて行う。これまでに鳥取産業技術センターにおいてR0.75mmの鋼球圧子を用いて行った試料片圧縮試験からは、シリコン板および合成石英板が、JX-ESPC-101114 NC-02内で規定されるJEMRMS子アームの2故障後の衝突を想定した発生荷重37.7kgf(R0.76mm)に対して、十分な耐荷重実績を示す事が確認された(SiO<sub>2</sub>基板の場合の最大点試験力は90.9kgf, Si基板の場合の最大試験力は94.4kgf)。さらに、原

子状酸素照射試験からは、f-QCC等の主要サンプルに対して、半年間の曝露で15 $\mu$ m程度の浸食が生じる事が分かったため、堆積厚みを>40 $\mu$ mと定め、試料の合成を進めている。

表4.3.1の4列目及び5列目には、搭載を予定する試料とその割り当て予定スロット位置(2014年11月2日時点)の情報を示す。2つの実験供試体 EE64-IおよびEE64-IIは、数サンプルをのぞいて、同じ数字番号のスロットには同等な試料が搭載されるように準備する。EE64-IおよびEE64-IIは、それぞれ、ExHAMの進行方向後方および側方に設置される予定であり、これにより、曝露環境が異なる2位置での物性変化の情報を取得でき、その原因の切り分けに役立つデータの取得が可能になる。また、2014年10月7日から16日にかけてJAXAの真空複合環境試験設備を用いて実施した原子状酸素照射実験では、危惧された試料物質の周辺への飛散と汚染は全く認められず、今回の試料の曝露面での掲示方法が適切である事が確認された。但し、万一に備えて地上対照試験では模擬できないレベルの試料の飛散とそれに伴う周囲の試料への汚染が合った場合を想定し、以下の点で工夫した配置を行っている。

(1)分析目的でシリコンおよび合成石英の異なる基板上に堆積させる同一試料については、仮に物質飛散によって互いに汚染をしても実験上の影響はないため、隣接して配置させ、万一の試料飛散に伴う汚染/被汚染のリスク低減をはかる。

(2)本研究テーマで最も重要な試料の一つであるfilmy QCC(A-1), dark QCC(A-3), Nitrogen containing Compounds (C-1)については、同一サブストレートに堆積させた同一(同種)試料を複数個準備し、それらを各実験供試体の曝露面内の異なる複数の位置に設置し、万一の周辺物質からの汚染に対するリスクの分散を図っている。

(3)試料中で、SiO<sub>2</sub>+coverとする試料については、原子状酸素の浸食を完全に防ぐ目的で、合成石英をサブストレートとする試料の上に合成石英板( $\phi$ 10mm, t=1mm)をかぶせた状態でホルダー内に設置する。この際、カバーである合成石英板は、原子状酸素から試料面をガードする目的の他、周囲試料や宇宙空間に飛散/浮遊する物質によるコンタミ量を評価する為のblank SiO<sub>2</sub>基板としての役割も兼ねる。特に、本課題で最も重要な試料の一つであるfilmy QCCなどについては、周囲のスロットに、合成石英板のカバーを置いた状態の試料を割り当てることで、汚染/被汚染のリスクを抑える配慮を行っている。

(4)この他、UV照射試験の結果や物性情報を基に、熱に対して変性量の大きな試料(Polyethylene; P-1, P-2, P-3, Polystyrene; Q-1, Q-2, Glycoladehyde dimmer; R-5)については、曝露面の左下角で周囲のサンプルへの影響が少ない場所、blankサブストレートの隣、あるいは周囲のスロットに主要炭素質物質が無いスロットにわりあてた。

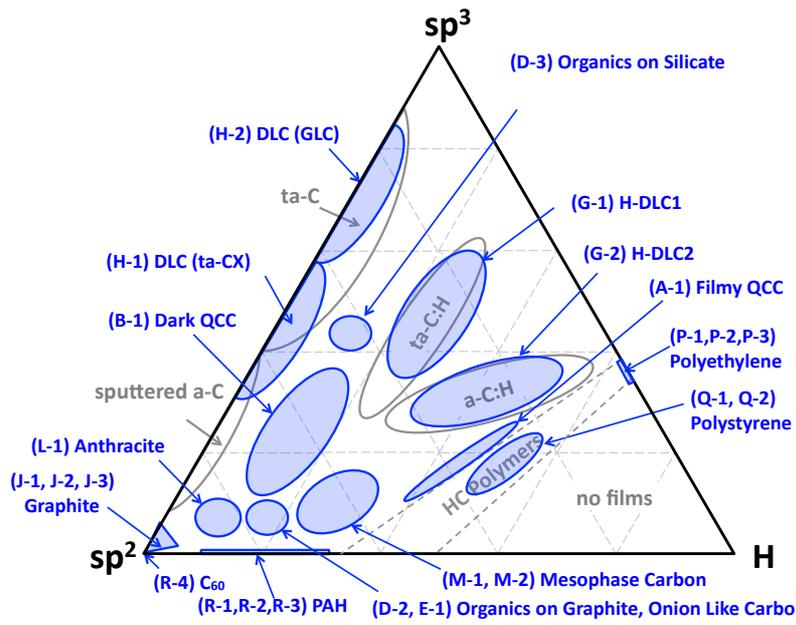


図 4.3.2 : 曝露実験に搭載する炭素質試料の物質状態を表す 3 元系の図

### 4.3.2 試料ホルダー、試料ホルダー台およびリン青銅板バネ、移送用蓋の設計

試料ホルダー(図4.3.2.1参照)、試料ホルダー台(図4.3.2.2参照)、およびリン青銅板バネ(図4.3.2.3参照)、移送用蓋(図4.3.2.4参照)の設計図面を以下に示す。試料ホルダーと試料ホルダー台は16本のM2.5のチタンねじで固定する。試料ホルダーは、EE64-I用とEE64-II用の2種類あり、試料ホルダーから試料の飛び出し量がおおよそ0.2mmになるように、試料に併せて0.8mm, 1.5mm, 1.8mmの深さの試料スロットを有する。移送用蓋は、移送時に衝撃等から曝露面試料を保護する目的で使用し、実験供試体をExHAM装着する前に取り外し、曝露実験後ExHAMから実験供試験体を外した後に装着する。

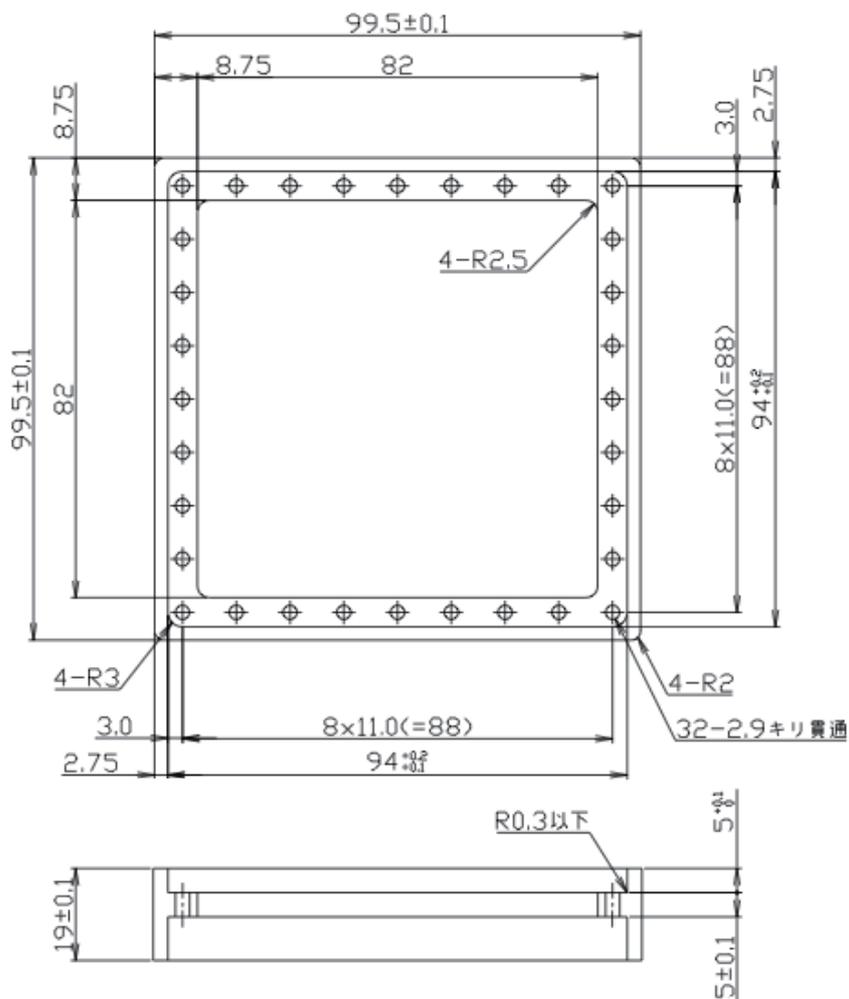


図4.3.2.1：試料ホルダー台の設計図面

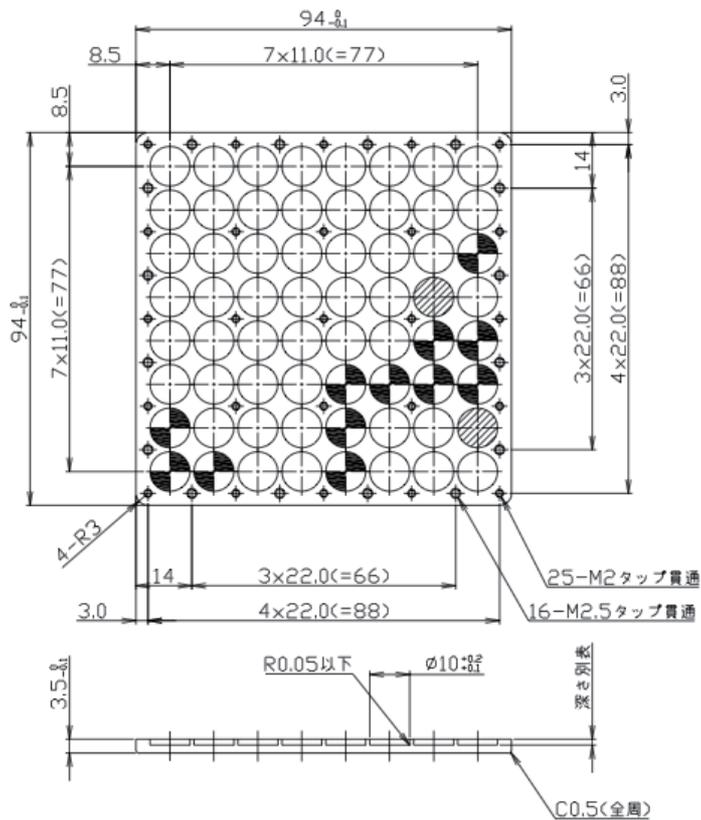


表1) ザグリ深さ

図示記号	ザグリ深さ	穴数
○	0.8±0.1	50ヶ所
◐	1.5±0.1	12ヶ所
◑	1.8±0.1	2ヶ所

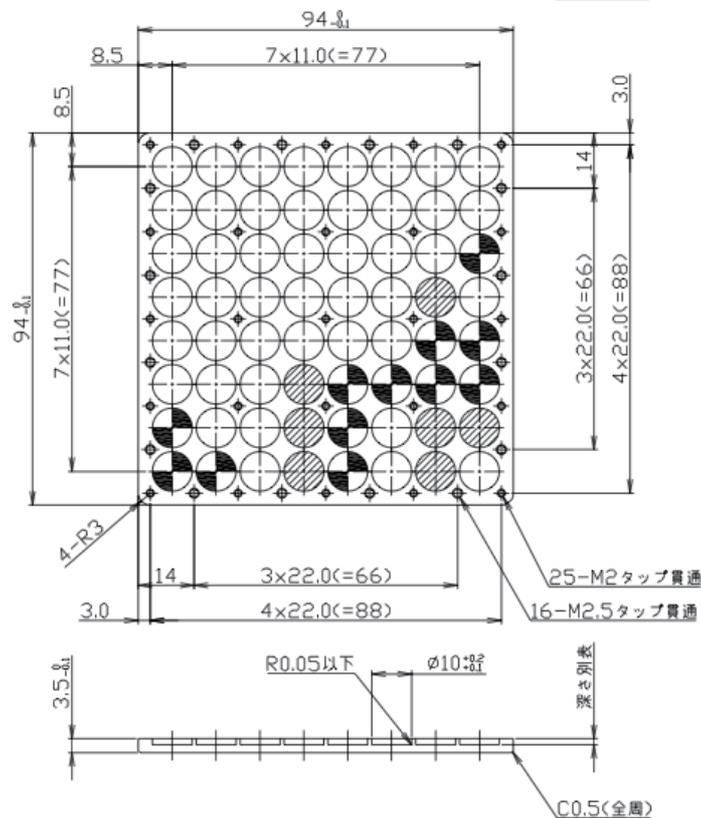


表1) ザグリ深さ

図示記号	ザグリ深さ	穴数
○	0.8±0.1	45ヶ所
◐	1.5±0.1	12ヶ所
◑	1.8±0.1	7ヶ所

図4.3.2.2 : 試料ホルダー(上 ; EE64-I用, 下 ; EE64-II用)の設計図面。深さが1.8mmのスロットで、厚さ1mmの合成石英板上に堆積させた試料の上に、更に厚さ1mmの合成石英板カバーを被せて配置する。

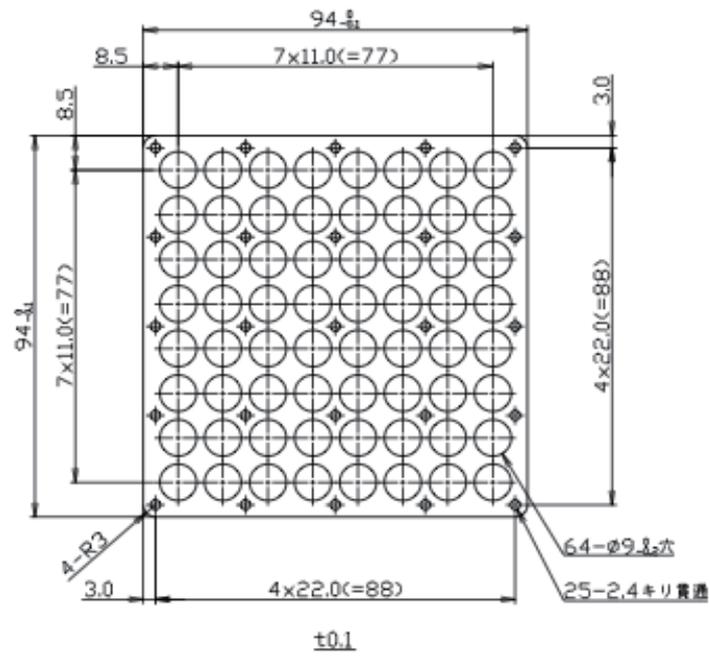


図4.3.2.3：板バネの設計図面

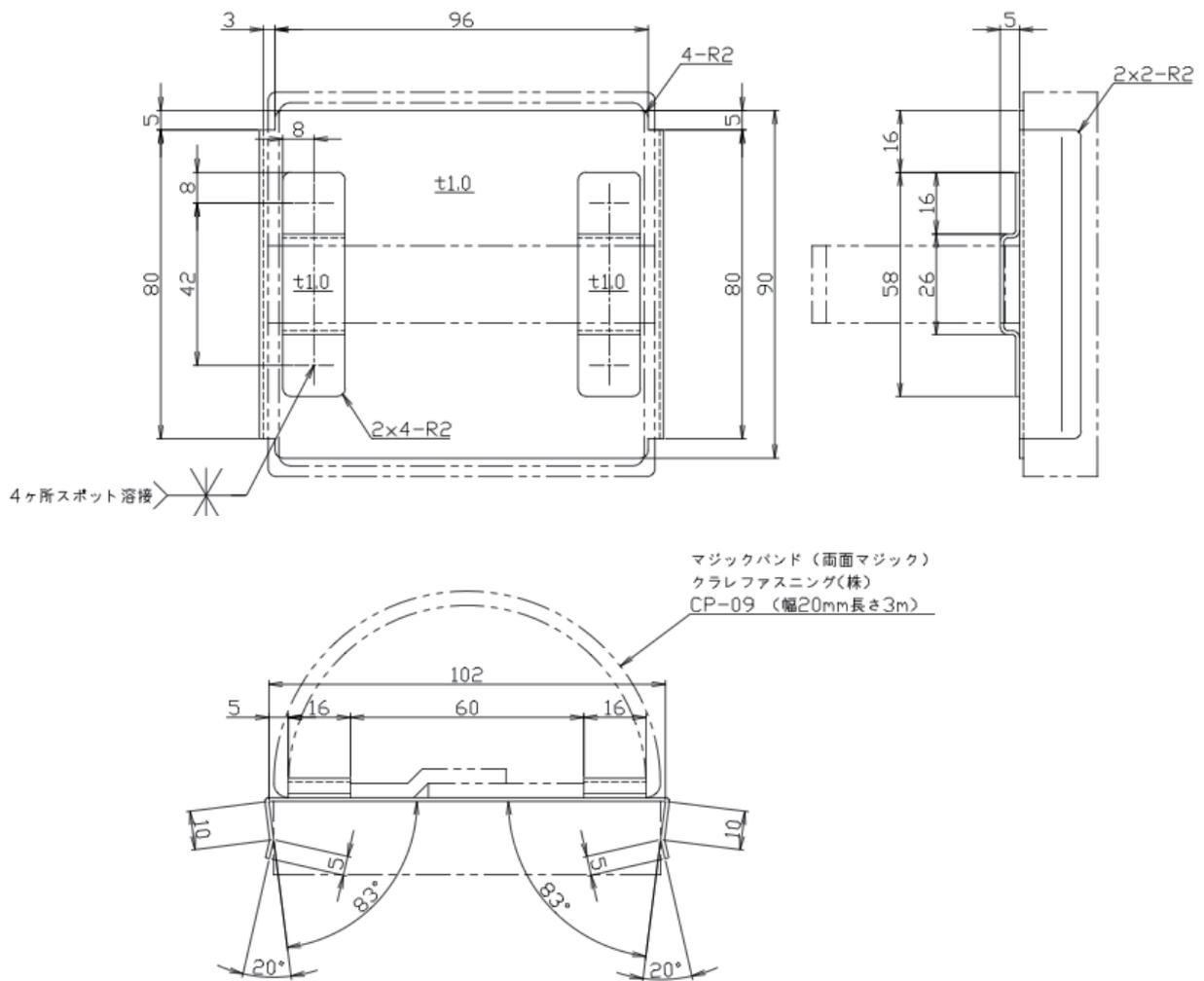


図4.3.2.4：保護蓋の設計図面

### 4.3.3 試料の固定方法

各試料は、厚さ1mm程度、直径10mmの円形板のサイズとし、試料固体をその形状に加工するか、同形状のシリコン板または合成石英板上に試料を蒸着した状態で準備する。試料は、各試料ホルダーあたり64個(合計128個)のスロットに設置し(一部放熱効率を上げる目的で、インジウムを挟むことを想定)、上部からリン青銅板バネで押さえ固定する。この際、リン青銅の板バネにはスロット位置に併せて直径9mmの穴が合計64個空けてあり、25本のステンレスのM2のねじで、試料ホルダーに留める際に、各試料の外円周部を押さえる事で、試料の試料ホルダーへの固定を実現させる役割を持つ(図4.3.3参照)。2014年9月29日に、宇宙科学研究所において、実験供試体PMに対して「ISS Pressurized Volume Hardware Common Interface Requirements Documents “SSP 50835 Revision D”」の表3.1.1.2.1.2.3.2-1「UNATTENUATED AND ATTENUATED RANDOM VIBRATION ENVIRONMENTS FOR END ITEMSOFT-STOWED IN A SINGLE CTB, X/Y/Z AXIS」に定義される振動条件(AT)に倣い、QT加振試験(AT+3dB, 加振時間10分)を行い、試料保持機構に問題が無い事を確認した。

表4.3.3 振動試験条件(AT)

Frequency (Hz)	Max. Flight RV Env <sup>1</sup>	20 lb ORU in Pyrell in a Single CTB
20	0.057 (g <sup>2</sup> /Hz)	0.1465 (g <sup>2</sup> /Hz)
20-153	0 (dB/oct)	-9.76 (dB/oct)
153	0.057 (g <sup>2</sup> /Hz)	0.0002 (g <sup>2</sup> /Hz)
153-190	+7.67 (dB/oct)	0 (dB/oct)
190	0.099 (g <sup>2</sup> /Hz)	0.0002 (g <sup>2</sup> /Hz)
190-250	0 (dB/oct)	0 (dB/oct)
250	0.099 (g <sup>2</sup> /Hz)	0.0002 (g <sup>2</sup> /Hz)
250-750	-1.61 (dB/oct)	0 (dB/oct)
750	0.055 (g <sup>2</sup> /Hz)	0.0002 (g <sup>2</sup> /Hz)
750-2000	-3.43 (dB/oct)	0 (dB/oct)
2000	0.018 (g <sup>2</sup> /Hz)	0.0002 (g <sup>2</sup> /Hz)
OA (grms)	9.47	1.29



図4.3.3：試料ホルダー台、試料ホルダー、リン青銅板バネの試作モデル(PM)に試料(テストピース)をインストールして組み立てた様子の写真。

#### 4.4 試料/試薬の輸送・保管条件

##### 4.4.1 シールバッグ(※過去の曝露実験試料の輸送で実績のある物を使用する)

シールバッグには実験供試体に蓋を装着した状態で収納する。キャビンの空気に含まれている水蒸気や酸素に長期間実験試料が曝され、吸湿および酸化されることを防ぐため、移送時および船内保管時には、実験供試体は蓋を装着した状態で、脱酸素フィルム(オキシキャッチ; 共同印刷)および吸湿フィルム(モイストキャッチ; 共同印刷)を張り合わせて作った脱酸素吸湿バッグ(OC/MCバッグ)に入れ、さらにシールバッグ内にて保管する。これにより長期間に亘り保管可能となる。地上回収用として、空のシールバッグおよび空の脱酸素吸湿バッグを各実験供試体につき1個用意する。

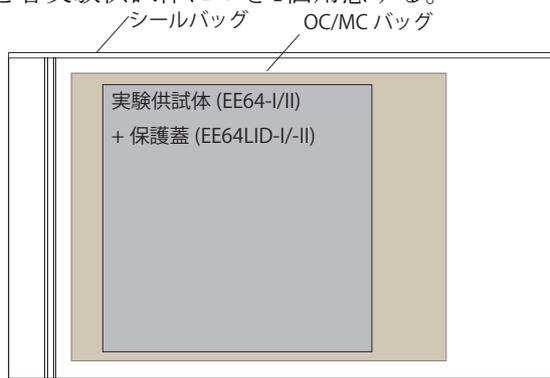


図4.4.1: シールバッグ内への実験供試体収納のイメージ。

##### 4.4.2 輸送容器(バブルラップバッグ)

輸送容器は物資輸送用バック (Cargo Transfer Bag: CTB) とインターフェースを持つ。輸送容器は、バブルラップバッグのようなものを想定、衝撃緩和を目的とし、往路、復路で使用する。往路では、OC/MCバッグ内に封入した実験供試体を入れたシールバッグ(往路用)と未開封のOC/MCバッグ(復路用)及びシールバッグ(復路用)を輸送する用途で用いる(図4.4.2参照)。復路では、回収した実験供試体をOC/MCバッグおよびシールバッグに入れた状態で輸送する回収容器としての用途で用いる。

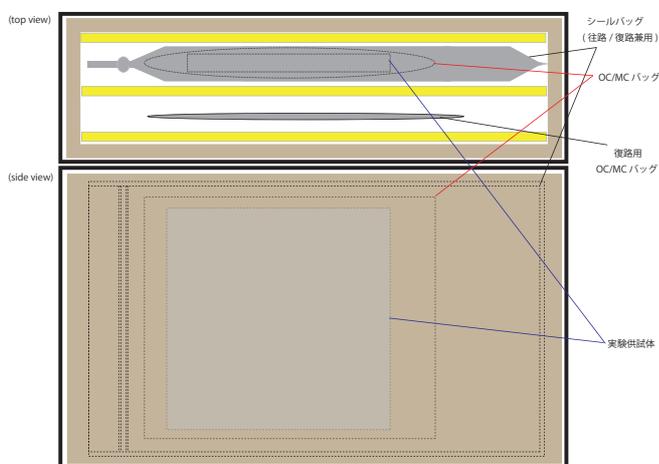


図4.4.2: 輸送容器内のシールバッグ(往路用/復路用)の収納のイメージ。

## 5. 実験方法

### 5.1 クルー操作及び実験シーケンス（準備のみ，ExHAM側と連携）

表5.1にクルー操作と実験シーケンスを示す。実験テーマが要求するクルー操作は実験供試体をICD通りにExHAMに取り付ける事と、実験供試体を回収する事のみである。

表5.1 クルー操作と実験シーケンス

Day	Step	期間 (day)	操作内容	対象実験群	実施上の注意事項
1	1	1	CTBから輸送容器を取り出す	輸送容器	
1	2	-	輸送容器からシールバッグを取り出す	輸送容器 シールバッグ	
-	3	-	ExHAMに試料を取り付けるまでの間、シールバッグをキャビン等の保管場所に保管しておく	シールバッグ	
2	4	1	ExHAMに試料を取り付ける直前にシールバッグを空ける。	シールバッグ	シールバッグを開けた状態でキャビンに保管しない。
2	5	-	実験供試体一式をシールバッグおよびOC/MCバッグから取り出す。	実験供試体	
2	6	-	実験供試体の保護蓋を取り外す。	実験供試体	作業時曝露試料面には触れない
2	7	-	ExHAMに実験供試体をICDに従い取り付ける。	実験供試体	作業時曝露試料面には触れない
2	8	-	取付状態の写真撮影	ExHAM	
-	9	-	ExHAMを船外プラットフォームに取り付ける	ExHAM	ExHAM側作業
-	10	-	与圧部窓からExHAMの取付状態を写真撮影を行う	ExHAM	
-	11	1年	ExHAMを宇宙空間に曝露させる	ExHAM	曝露実験
-	12	-	ExHAMを船内に回収する	ExHAM	ExHAM側作業
	13	-	回収時の写真撮影	ExHAM	
3	14	1	ExHAMに取り付けていた実験供試体を取り外す	実験供試体	作業時、曝露試料面には触れないようにする
3	15	1	実験供試体に保護蓋を取り付ける	実験供試体	作業時、曝露試料面には触れないようにする
3	16	-	取り外した実験供試体を回収用のOC/MCバッグに入れた上で、シールバックに入れる	実験供試体	シールバッグを開けた状態でキャビンに保管しない。
3	17	-	シールバックを輸送容器に収納する	実験供試体 シールバック	
4	18	1	輸送容器をCTBに入れる	CTB	
合計		4			

・クルー休日に伴う実験日調整：クルーの休日等にかかり試料をExHAMに取り付け/取り外し作業の中断が予想される場合には、試料をシールバッグに入れた状態で放置（作業休止）することで問題はない。

## 5.2 実験条件

軌道上で船外プラットフォームにExHAMが取り付けられ、実験供試体が宇宙空間にノミナル運用で1年間曝露されること。本実験は、供試体打ち上げ後、軌道上での実験開始日の要求は無い。

## 5.3 計測及び観察方法

軌道上ではExHAMによる宇宙環境曝露を実施するのみで、実験テーマとして、軌道上での計測、観測は要求（デジタル/アナログデータ、画像データ、音声通信）は無い。ExHAMや船外プラットフォームのシステム機器には、温度、放射線等の履歴を記録する機能が無いため、本実験では、可能であれば、材料に宇宙環境での利用実績のあるサーモラベル等、不可逆側の温度、UVシールを実験試料に貼る予定である。

## 6 地上検証試験概要

フライト品の試料をインストールした実験供試体に、表6.1に示す機械特性試験を実施し、個別ICDとの適合性を確認する。

表6.1 地上検証試験

番号	試験名	試験内容	備考
S1	目視検査	実験供試体に傷、異物、破損等が無いかを目視にて確認する。	東京大学で実施
S2	寸法検査	供試体の外形寸法がICDを満たしている事を確認する。	エムシステムで実施
S3	質量検査	供試体の質量がICDを満たしている事を確認する。	エムシステムで実施
S4	真空試験	AL内圧力変化(減圧/加圧)0~104.8[kPa]及びAL内圧力変化率(減圧/加圧)1.0[kPa/s]に耐える事を確認する。	宇宙科学研究所(TBD)で実施
S5	振動試験(AT)	ATレベルの振動試験を実施し、試料の固定方法、試料の剥離・破損等がないかを確認する。	宇宙科学研究所で実施
S6	熱晒し試験(AT)	予想される高温温度、低温温度に一定時間晒し、供試体に物性に变化が無いことを確認する。さらに、真空耐性、減圧レートに関する耐性を確認する。	東京大学で実施
S7	適合性確認試験	適合性確認試験計画書JDX-2014221に従って実施する。	筑波宇宙センター(TBD)で実施

## 7 曝露前・曝露後実験

### 7.1 曝露前測定実験

曝露前実験は、曝露前の物質の特性を定義する為の測定項目として表7.1に示す各項目の実験を実施する。但し、一部、測定の際に破壊(一部破壊を含む)を伴う実験については、フライト品と等価なサンプル(製造工程等が同一のもので、且つ、非破壊の赤外線分光測定で同一の特徴を有する事を確認する)を用いて測定行う。それらの測定項目の一部は、必ずしもフライト品搬出前の時期に実施する必要はない(実験番号B5, B6, B8-B10が該当)。

表7.1 曝露前実験の内容

番号	試験名	FM	FM同等品	試験内容	設備・機材	場所
B1	目視検査	○		実験供試体に傷、異物、破損等が無いかを目視にて確認する。	デジタルカメラ	東京大学
B2	寸法検査	○		実験供試体に用いるFM試料の堆積厚みを測定する。	3次元測定器	東京大学
B3	質量検査	○		実験供試体に用いるFM試料の堆積量を測定する。	高精度電子天秤	東京大学
B4	赤外線分光測定	○		曝露前の各FM試料の赤外物性特性を定義する。	Bruker Optics社 赤外フーリエ分 光光度IFS125/ ATRユニット	東京大学
B5	紫外線分光測定		○	FM同等品を用いて、各FM試料の曝露前の紫外線特性を定義する。	可視、紫外分光光 度計	東京大学
B6	ラマン分光測定		○	曝露前の各FM試料のラマン分光特性を定義する。	ラマン分光装置	電気通信大学
B7	赤外顕微鏡観察	○		曝露前の各FM試料の複数場所の赤外線特性を定義する(一部マッピング測定)。	赤外顕微鏡	東京大学
B8	紫外線光電子分光(UPS)		○	FM同等品を用いて、各FM試料の炭素結合状態を定義する。	紫外線光電子分 光装置	電気通信大学 (TBD)
B9	X線光電子分光(XPS)		○	FM同等品を用いて、各FM試料の炭素結合状態を定義する。	X線光電子分光装 置	電気通信大学 (TBD)
B10	透過型電子顕微鏡(TEM)観察		○	FM同等品を用いて、各FM試料の電顕画像を取得する。	透過型電子顕微 鏡(TEM)	電気通信大学

## 7.2 曝露後測定実験

曝露による実験試料の物性変化を詳細に調べることが目的であるため、曝露後測定実験の検査項目は、表7.2に示す通り、前節の曝露前測定実験の項目(表7.1参照)と基本的に同じである。

表7.2 曝露後測定実験の内容

番号	試験名	試験内容	設備・機材	場所
A1	目視検査	実験中の破損状況の有無の確認、回収試料の色の変化などの視覚情報の確認を行う。	デジタルカメラ	東京大学
A2	寸法検査	回収試料の堆積厚みを測定し、原子状酸素による浸食の程度を測定する。	3次元測定器	東京大学
A3	質量検査	回収試料の原子状酸素による浸食、揮発等による散逸量を測定する。	高精度電子天秤	東京大学
A4	赤外線分光測定	回収物質の赤外物性特性を測定する。	Bruker Optics社赤外フーリエ分光光度IFS125/ATRユニット	東京大学
A5	紫外線分光測定	回収物質の紫外線特性を測定する。	可視、紫外分光光度計	東京大学
A6	ラマン分光測定	回収試料のラマン分光特性を測定する。	ラマン分光装置	電気通信大学
A7	赤外顕微鏡観察	回収試料に対して、曝露前測定実験と同位置の赤外特性(一部マッピング測定)を取得する。	赤外顕微鏡	東京大学
A8	紫外線光電子分光(UPS)	回収試料の炭素結合状態を定義する。	紫外線光電子分光装置	電気通信大学(TBD)
A9	X線光電子分光(XPS)	回収試料の炭素結合状態を定義する。	X線光電子分光装置	電気通信大学(TBD)
A10	透過型電子顕微鏡(TEM)観察	回収試料の電顕画像を取得する。	透過型電子顕微鏡(TEM)	電気通信大学

## 8 地上対照実験

ExHAMを用いた曝露実験によって生じる、試料の物質変性の主要因子の特定し、実際の宇宙空間での物質変性に一般化する際の見知を得る目的で、表8.1に示す地上対照実験を実施する。このため、地上対照試験後の試料に対して、曝露後実験と同じ検査項目(表7.2参照)を実施する予定である。特に原子状酸素との相互作用による変質と他の環境要因(特に紫外線照射や電子ビーム照射)による変質の切り分けは慎重に行う必要があり、さらに、試料選定および堆積量決定の判断材料とする為、地上対照実験項目R1, R2, R3は2014年10月中に行う。

表8.1 地上対照試験

番号	試験名	試験内容	設備・機材	場所
R1	原子状酸素(AO)照射試験	原子状酸素(AO)照射単体で、軌道上1年分の曝露量を模擬する実験を実施し、試料の物性への影響を調査する。	真空複合環境試験設備	筑波宇宙センター
R2	紫外線(UV)照射試験	紫外線(UV)照射単体で、軌道上1年分の曝露量を模擬する実験を実施し、試料の物性への影響を調査する。	真空複合環境試験設備	筑波宇宙センター
R3	電子ビーム(EB)照射試験	電子ビーム(EB)照射単体で、軌道上1年分の曝露量を模擬する実験を実施し、試料の物性への影響を調査する。	真空複合環境試験設備	筑波宇宙センター
R4	中性子線照射試験	中性子線照射単体で、軌道上1年分の曝露量を模擬する実験を実施し、試料の物性への影響を調べる。	重粒子線照射研究設備	東京大学大学院工学系研究科
R5	陽子線照射試験	陽子線照射単体で、軌道上1年分の曝露量を模擬する実験を実施し、試料の物性への影響を調べる。	重粒子線照射研究設備	東京大学大学院工学系研究科
R6	ガンマ線照射試験	ガンマ線照射単体で、軌道上1年分の曝露量を模擬する実験を実施し、試料の物性への影響を調べる。	真空複合環境試験設備	日本原子力研究機構 高崎量子応用研究所

## 9. 解析評価項目

現在でも決定的な同定には至って居ない未同定赤外バンドや星間減光曲線に見られる2200Åの構造の担い手が、宇宙空間に於ける有機物進化のストーリーの中で鍵となるメンバーであることは疑いない。まずは、その素性を理解する為に、始源的炭素質物質の候補として準備した曝露試料が被る化学／物理的な変質過程を明らかにする事が重要なステップとなる。星周環境では、恒星風中のイオンとの衝突、放射能や高エネルギー光子への曝露が、炭素質物質の進化に影響する事が想定される。電子やイオンとの衝突(地上対照実験R3、及び、地上対照実験R5と一部関連)の場合、分子構造が物理的に変性を受けたり、ガンマ線光子の照射(地上対照実験R6)の場合、分子構造に欠陥が生じたり、結晶構造をアモルファス化させたりする等の物質変性が予想される。また、X線や紫外線の照射(地上対照実験R2)の場合、分子の電子状態への影響が予想される。曝露前後において見られる試料の物性変化を捉え、その主要因を特定する事が、本実験の主目的であり、このために、曝露前、曝露後の測定試験および地上対照試験で得られた結果との比較から、表9.1に示す評価を実施する。

表9.1 実験結果の評価方法

評価項目	評価方法・手段
未同定赤外バンドとの類似性の評価	曝露前/後試料、および地上対照試験後の試料に対して、赤外線分光(実験項目 A4, A7, B4, B7)測定を行い、各振動モードに対応する赤外バンド中心波長位置、バンド幅、強度比を評価し、観測される未同定赤外バンドとの類似性の評価を行う。ラマン分光(実験項目;A6, B6)からは、各格子振動の振動数に対する情報を取得し、補助的に利用する。
星間減光曲線に見られる2175Åバンプ構造との類似性の評価	曝露前/後試料、および地上対照試験後の試料に対して、紫外線分光(実験項目; A5)測定を行い、紫外線域(特に 2200Å付近)に見られる吸収構造の中心波長位置、バンド幅、形状を評価し、観測される星間減光曲線との類似性の評価を行う。
表面の化学結合構造の変化	曝露前/後試料、および地上対照試験後の試料に対して、紫外線光電子分光(UPS; A8, B8)による測定を行う。UPS測定からは、主に価電子帯の光電子スペクトルが得られるため、表面にどのような化学結合が存在しているかを各試料に対して評価できる。
炭素の結合状態(電子状態)の変化	曝露前/後試料、および地上対照試験後の試料に対して、X線光電子分光(XPS; A9, B9)による測定を行う。XPS測定からは、より深い内核光電子スペクトルから、sp <sup>2</sup> 混成成分幅に起因する構造、sp <sup>3</sup> 混成成分幅に起因する構造、および欠陥成分(原子空孔)に起因する構造の変性変化を調査できる。さらに、結晶質／非晶質の割合の変化を見積もる。

## 10. その他

特になし。

以上