

平成 26 年度「きぼう」利用候補テーマ 一般区分 技術開発テーマ  
「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

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」について、その目的、ミッションの概要とサクセスクライテリアについてまとめたものである。

文書番号		MRD-QCC20150118
文書承認年月日		2015年01月18日
作成	承認	備考
2015. 01. 18	2015. 01. 18	

## 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」について、その目的、ミッションの概要とサクセスクライテリアについてまとめたものである。

### 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. 参考文書

- (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」実験計画書

## 2. ミッションの定義

### 2.1. 科学的背景とミッションの目的

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年代以降、赤外線衛星ミッションの活躍により、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、その担い手は大型の有機物分子である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や星間物質の赤外スペクトルに観測されるため、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、実験室や理論研究で扱える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。

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(Poly-Cyclic Aromatic Hydrocarbons; PAHs)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、「それらの物質を星周輻射場環境下に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。これにより、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。

## 2.2. 研究分野の現状および本ミッションの意義

星間ダストの研究は、かつてより、特に衛星を中心とする赤外線天文観測と、実験室での固体微粒子の合成や変性を扱う実験天文学、固体物理学および分子の各振動モードに対する量子化学計算など、観測／実験／理論の各分野の連携のもと行われて来た。1990年代中盤にヨーロッパ欧州天文台ISOおよび我が国の赤外線宇宙望遠鏡(InfraRed Telescope in Space; IRTS)が、大気吸収に妨げられる事無く、未同定赤外バンドの全波長域の姿を初めて捉え、様々な天体環境に普遍的に存在する赤外バンド構造である事を示すようになると、その担い手がDuley & Williams (1981)らによって提案される多環式芳香族炭化水素(Polycyclic Aromatic Hydrocarbon; PAH)や、我が国のSakata et al. (1983)らによって提案される急冷炭素質物質(Quenched Carbonaceous Composite; QCC)と関連する物質であることが広く認識されるようになり、特にPAH仮説に基づいて実験天文学を推進したNASA Amesのグループを中心とする実験研究および理論研究が、観測データの解釈を支える大きな貢献をした。

その後、2000年代に入るとSpitzer宇宙望遠鏡、および我が国の赤外線天文衛星「あかり」が活躍し、高感度の赤外分光能力を活かして、より多様な天体環境に未同定赤外バンドを検出する一方で、その担い手の同定は未完了のままである。よりその具体的な担い手の物質同定の進展に進展を得ない限り、現在の実験／理論研究に基づく知識では、観測される未同定赤外バンドの情報から担い手の星間空間での物質進化のシナリオや担い手の置かれる星間物理環境を読み解く事が難しい状態に直面している。

我が国の実験天文学の歴史に於いて、Sakata et al. (1983)は、2.45GHzプラズマ発生装置を製作し、メタンガスをプラズマ状態にした後、急冷して基板上に炭素質物質を回収し、急冷炭素質物質(QCC)と命名した。QCCは採取場所によって、大別してdark-QCCとfilmy-QCCが回収され、後者は炭素数が20-40程度の多環式芳香族炭化水素に近い分子を多く含む炭素質物質であるのに対し、前者はfilmy QCCより炭化が進んだ炭素質物質である。特に、dark QCCは紫外線星間減光曲線中に見られる2175Åのバンプ構造を再現する数少ない実験生成物であり、filmy QCCも加熱変性を経て同じく2175Åのバンプ構造を再現する事が知られていて、conjugated double bond(-C=C-C=C-)の構造がこのバンプ構造と関連する事が指摘されている(Sakata et al. 1994)。また、filmy QCCのスペクトルは未同定赤外バンドと類似した赤外吸収スペクトル構造を示すことが知られていることから、QCCが未同定赤外バンドの担い手と進化上の連関を持つ事が示唆されている。

最近の観測からは、熱源の温度の低い(約5000°C以下)天体の星周環境に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報告(Sloan et al. 2007)されたり、惑星状星雲にフラレーン(C60)が発見(Cami et al. 2010)されたりして、炭素質ダストの多様性が注目されつつある。さらに、未同定赤外バンドの担い手やフラレーンが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や未同定赤外バンドの担い手を供給する炭素質ダストの物質進化パスが提案されている(Garcia-Hernandez et al. 2011)。

こうした状況を踏まえて、多様な炭素質物質間の進化上の連関を解き明かすためには、まずは「星周輻射場環境下での炭素結合状態の変化」に着目し、その過程を実験的に調べる事が有効であると判断できる。本実験では、晩期型巨星の星周で凝縮する最も初期の炭素質物質を模擬する物質として、QCCやHACを想定し、それらを曝露試料に選定する。これによって、曝露実験の初期条件として幅広い範囲の炭素結合状態の物質をカバーすることができ(同テーマ実験計画書 表4.3.1及び図4.3.1参照)、曝露実験前後での物性比較を通じて、普遍的な未同定赤外バンドの担い手誕生の鍵となる炭素結合状態の変質過程とその成因に迫ることができる。

さらに、研究代表者らは、同実験装置を用いて、異原子の混入する炭素質物質の合成実験を試み、多環式芳香族炭化水素を原材料に窒素プラズマを照射させる事で合成した窒素混入炭素質物質が、異なる種類の多環式芳香族炭化水素を原材料として実験を行った場合でも、極めて未同定赤外バンドと類似した赤外吸収スペクトル特性を示すことを発見した。このことは、未同定赤外バンドが、系内の銀河拡散光から系外銀河にいたるまで、多少の差異こそあれ、極めて類似したスペクトル構造を示す均質性を説明する上で、「異原子の混入」が着目すべきポイントである事を示唆する。従って、「異原子(特に窒素原子)の混入」を視野に入れた実験研究が、より現実的な未同定赤外バンドの同定に重要な進展を与える可能性があるかと判断し、窒素含有炭素質物質も、本曝露実験の試料として選定する。

本実験は、「炭素結合状態の変性」及び「異原子混入の影響」を実験テーマの基軸に据えて、始源的炭素質物質の候補物質となる実験合成物の選定を行っており、「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」実験棟船外簡易取り付けExHAMを利用して実験的に検証する。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解明し、宇宙に於ける最も普遍的かつ基礎的な有機物誕生の過程の理解が可能になると期待され、そこに本曝露実験計画の意義がある。

### 3. ミッション要求

#### 3.1. プログラムからの前提条件

炭素質物質のサンプルリターンを主目的とするはやぶさ2プロジェクトにおいて、実験室で扱う炭素質ダストとIDPの関連を扱う上で、太陽の星周輻射場環境下における炭素質物質の変性過程を同定する実験データが必要とされる。また、次世代赤外線天文衛星SPICAプロジェクトにおいて主要なテーマの一つとして位置づけられる「銀河星間空間における物質輪廻の解明」に備えて、多様な炭素質ダストの進化上の関連に実験に基づいた知見を得る事が、重要な布石となる。同時に、未同定赤外バンドの担い手の正確な理解は、系内だけでなく遠方銀河の星間物質に至るまで普遍的に観測される未同定赤外バンドを利用して星間物理環境を読み解く目的において、赤外線観測天文学からの強い要望がある。

#### 3.2. 技術的制約条件

主に恒星風中の電子や荷電粒子との衝突や、放射線、高エネルギー光子への曝露が、星間空間に於ける炭素質物質の進化に影響する事は容易に想定される。荷電粒子との衝突の場合、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線や紫外線の照射の場合、分子の電子状態への影響が予想される。実際には、これらの影響が複雑に絡み合っ、物質変性が進展することが考えられるが、地上実験に置いては、先述の通り、密度やエネルギー範囲、継続時間に関する条件が極めて限定的である上に、単独の要因ごとにしか影響を調査することができない。従って、実際の太陽の星周輻射場環境下に固体微粒子試料を曝露し、その前後での物性変化を調査することが、宇宙空間のダストの物理/化学進化を直接実証するために必要不可欠な方法である。この目的で、きぼう実験棟船外簡易取付を用いた実験提案が現実的に唯一の機会となる。

#### 3.3. ミッション要求

本実験のミッション要求を以下に示す。

- ・ 晩期型巨星の星周空間で形成される始源的な炭素質ダストの候補試料を実験室で合成・準備し、炭素質ダストの変性が期待される太陽近傍の宇宙環境(注1)に曝すこと及び試料回収が可能な「きぼう」を用いたミッションを実施する。

- ・ 実験試料は、「曝露実験による炭素結合状態の変性」及び「異原子混入の影響」に着目し、未同定赤外バンドおよび星間減光曲線の2175Åのバンプの担い手との進化上の関連が期待される炭素質実験合成物を中心に選定する。
- ・ 実験供試体は、試料ホルダー台、試料ホルダー、試料、リン青銅板バネ、ステンレスねじ、保護蓋からなる。本実験で用意する実験供試験体の数量は2つとする。各実験供試体には、64個の試料スロットがあり、合計128個の試料を曝露実験に供する。
- ・ 曝露実験試料を地上に持ち帰り、曝露実験前後での、赤外／紫外分光特性、表面の結合構造、電子顕微鏡観察結果の差異を調べる。これによって、未同定赤外バンドの放射や星間減光曲線の2175Å構造の特徴により近い光学特性に変化したサンプルを探す。さらに、物性分析結果や地上対照実験(3.4節参照)結果を踏まえて、その変化に寄与する変性過程を特定し、宇宙環境における多様な炭素質ダストの進化過程を考察する。

(注1) 表面温度5000-6000Kの太陽輻射場や太陽風への1年間の曝露は、晩期型巨星周囲で形成されたダストが、比較的穏やかなスピード(~10km/s)で中心星から遠ざかる過程で被る輻射場や恒星風の影響を調査する目的で必要十分な手法である。晩期型巨星の進化において、最もはじめのフェーズとして、漸近巨星分岐(AGB)期があり、その後、post-AGB、惑星状星雲のフェーズに移行する。漸近巨星分岐(AGB)期において、表面温度は2000-3000Kで、この時期に、炭素質ダスト形成が期待され、その後、post-AGB期、若い惑星状星雲になると、表面温度は10000K近くに上昇する。従って、太陽近傍の輻射場環境は、この遷移期の温度に該当する。

### 3.4. 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、下表に示す地上対照実験を実施する。評価はフライト品と同じ検査項目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、それらの地上対照実験項目はフライト準備段階において実施する。



### 3.5. サクセスクライテリア

本実験のサクセスクライテリアを表3.4に示す。本成功基準の達成判断は、回収試料に体する曝露後測定実験(実験計画書の表7.2を参照)の実施結果と、地上対照試験の結果をふまえて、回収後半年以内に結論を出す。

表3.4 サクセスクライテリア

	ミッション
Minimum Success	実験試料の曝露前後の物性測定評価によって、宇宙曝露環境(*1)が炭素質物質の化学結合状態や電子状態(*2)に及ぼす変化(*3)を把握できること。
Full Success	回収した実験試料の中から、未同定赤外バンドの放射や2175Å星間減光バンプの特徴により近い光学特性を示す実験試料を識別し、地上対照実験の結果も踏まえて、その変化の鍵となる変性要因(*4)を特定できること。
Extra Success	回収した実験試料の物性変化の中に、太陽系における有機物進化の鍵となる変性プロセス(*5)を見だし、地上対照試験結果との比較から、その実験的な根拠が得られること。

(\*1) 電子衝突、陽子衝突、紫外線/X線/ガンマ線照射などの複合的環境。

(\*2) 炭素-炭素(C-C)結合・炭素-窒素(C-N)結合・炭素-水素(C-H)結合のaliphatic/aromatic比、結晶質/アモルファス比など

(\*3) 未同定赤外バンド・2175Å星間減光バンプの担い手の同定につながる変化。

(\*4) 電子衝突、陽子衝突、紫外線/X線/ガンマ線照射など。

(\*5) 糖、アミノ酸などのバイオマーカーに含まれる構造(アミン、ケトンなど)の形成が得られること。

#### 4. 体制

図4.1に本実験の研究体制図を示す。本研究テーマは、東京大学、北海道大学、電気通信大学、日本大学及び宇宙研に所属するメンバー(研究代表者、共同研究者、連携研究者で構成)で構成されるQCCミッションチームが、JAXAと連携しながら実施する。特に、実験結果の迅速かつ効果的な成果報告を心がけ、はやぶさ2やSPICAプロジェクトなどへの派生を意識して取り組む。

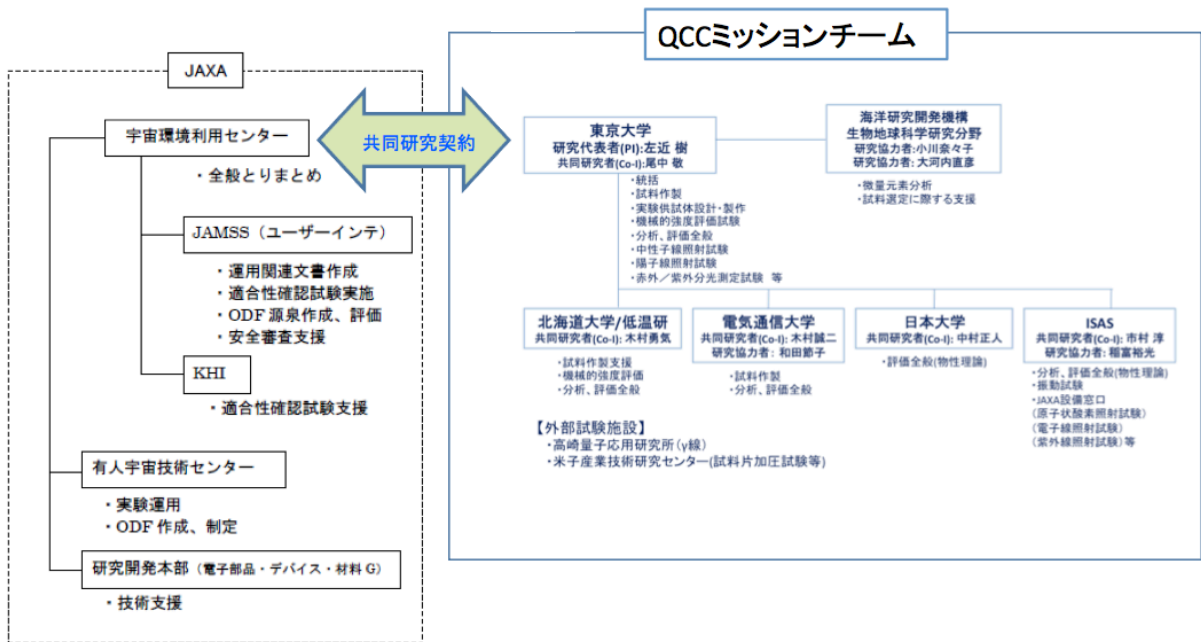


図4.1 本研究の体制

## 5. スケジュール

実験供試体の打ち上げまでのスケジュールの線表を図5.1に示す。

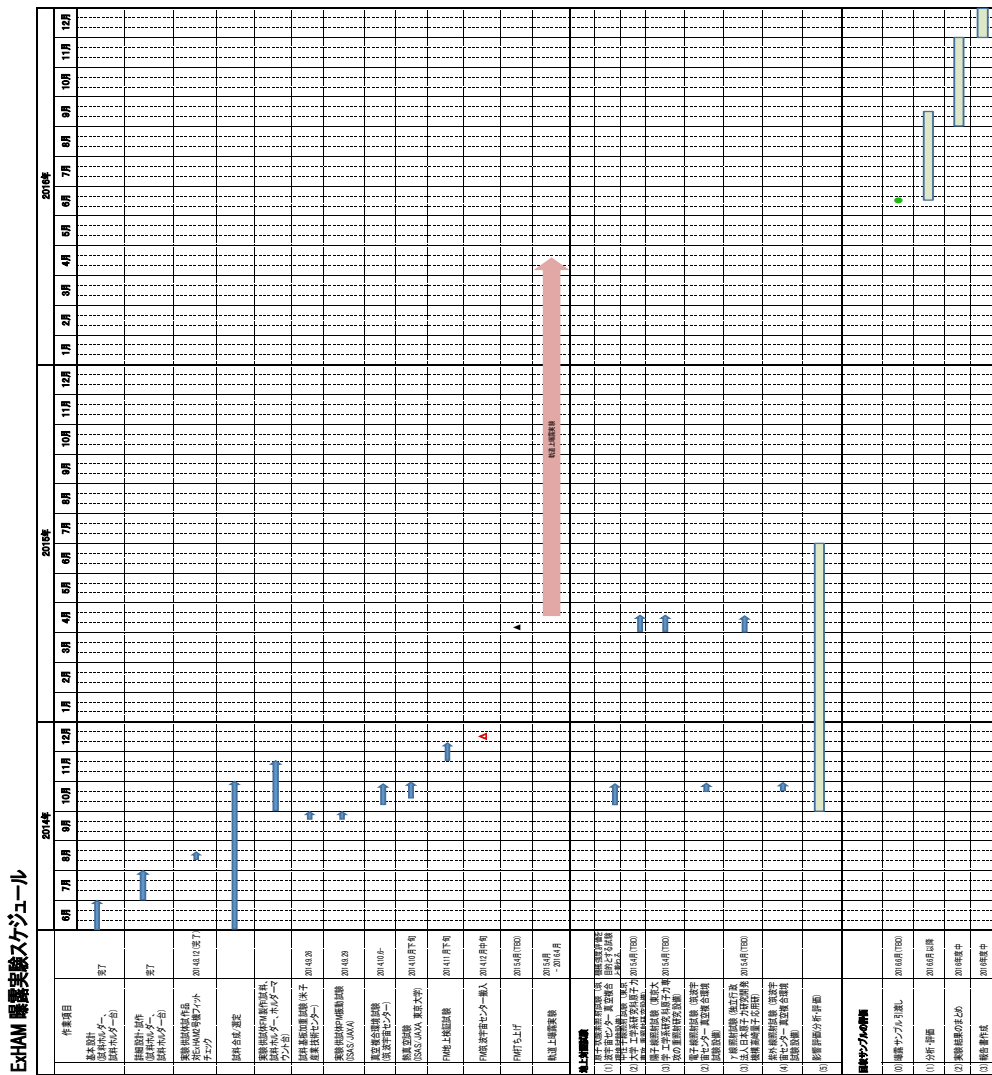


図5.1 実験試料開発と実験のスケジュール案