

小規模計画「DUSTの核生成」 初年度活動報告



計画提案名：DUST

(Determining Unknown yet Significant Traits)

木村勇氣	北海道大学	Joseph Nuth	NASA/GSFC
Jürgen Blum	地球物理・地球外物理研究所、ドイツ		
田中今日子	北海道大学	野沢貴也	国立天文台
左近樹	東京大学	田中秀和	東北大学
木村宏	千葉工大	山崎智也	北海道大学
渡部直樹	北海道大学	香内晃	北海道大学
Saso Sturm	ヨーゼフステファン研究所		
Nirmal K. Velu	ISAS	竹内伸介	ISAS
松原英雄	ISAS	稲富裕光	ISAS
WG:	DUSTの核生成		

(206) 第18回宇宙科学シンポジウム、宇宙研、2018年1月10日

計画の目的：宇宙ダストの重要性

□ 惑星の材料

A. J. Weinberger, *Nature* 433,114, 2005.

□ 分子形成の基板

N. Watanabe, A. Kouchi, *Prog. Surf. Sci.*, 83, 439, 2008.
J. A. Nuth, N. M. Johnson, *Science*, 336, 424, 2012.

□ 星間や星周環境でエネルギー収支を担っている

Schutte & Tielens, *Astrophys. J.* 343, 369, 1989.
Takeuchi *et al.*, *Astron. Astrophys.* 440, L17, 2005.

□ 星形成を促進する(2桁大きな星形成率)

L. J. Tacconi, *et al.*, *Nature* 463, 781, 2010.
C. F. McKee, *Science* 333, 1227, 2011.

ダストの組成やサイズ・質量を
明らかにする事が決定的に重要

2012年実施(S-520-28号機)		計画の目的: 全体像
	鉄粒子の核生成実験 目的: 鉄を用いて核生成の素過程を解明し、宇宙における鉄の存在形態を理解する。 成果: 鉄原子同士の核生成時の付着確率は、その後の成長時の値よりも4桁も小さいことを明らかにした。星間空間に鉄ダストが存在していない理由を明確にし、鉄は化合物や不純物として固体に取り込まれていることを示唆した。天文学分野に鉄の存在形態の再考を求める成果である。核生成の素過程の一端を解明した成果は、国際結晶成長機構におけるSchieber賞受賞につながった。 Science Advances 2017など	
2015年実施 (S-520-30号機)		
	酸化物系(シリカとアルミナ)粒子の核生成実験 目的: 地球を含めた太陽系天体の材料の初期状態を知る。 成果: 二波長干渉計による核生成環境の計測に加えて、独自に開発した『浮遊ダスト赤外線スペクトルその場測定装置』を小型化して搭載することで、天体周辺に浮いているダストの赤外線スペクトルの再現に成功した。本成果は、参加学生の国際学会におけるポスター賞受賞につながった。Chemistry of Materials 2016など	
本小規模計画 (飛翔体: 欧州との協力による回収可能な観測ロケット)		
	炭素質物質の生成過程の解明 目的: 星間物質の主要成分の一つである炭素質物質の生成に必須のデータを取得し、その進化史を明らかにする。 意義: 2020年代に、はやぶさ2やOSIRIS Rex、MMXが回収する炭素を含んだ小惑星試料や、次世代赤外線天文衛星SPICAなどによる観測データの解釈の根拠となる実測データを取得できる。	
本小規模計画 (飛翔体: NASAの回収可能な観測ロケット)		
	シリケート粒子の生成過程の解明 目的: 酸素星および惑星系星雲におけるシリケートダストの生成過程の理解 意義: シリケートは宇宙の至る所に存在しており、地球表層の主要鉱物でもあることから、最も重要な鉱物の一つである。その、核生成過程を理解するために必須の、クラスターからナノ粒子へと成長する過程における構成分子の付着確率や表面自由エネルギーを求め、赤外線スペクトルの時間変化から結晶化の初期過程を解明することで、宇宙物質の創成史を確立できる。	
将来計画 (飛翔体: 観測ロケット、ISSなど)		
	氷粒子の生成過程の解明 目的: 原始太陽系における、氷の存在形態の解明 意義: 氷は原始太陽系での複雑な分子の供給源であり、氷がどのダスト上に、どのような条件で核生成するのかを知ることは、アストロバイオロジーや惑星形成論の議論に必須の礎を築くことになる。	

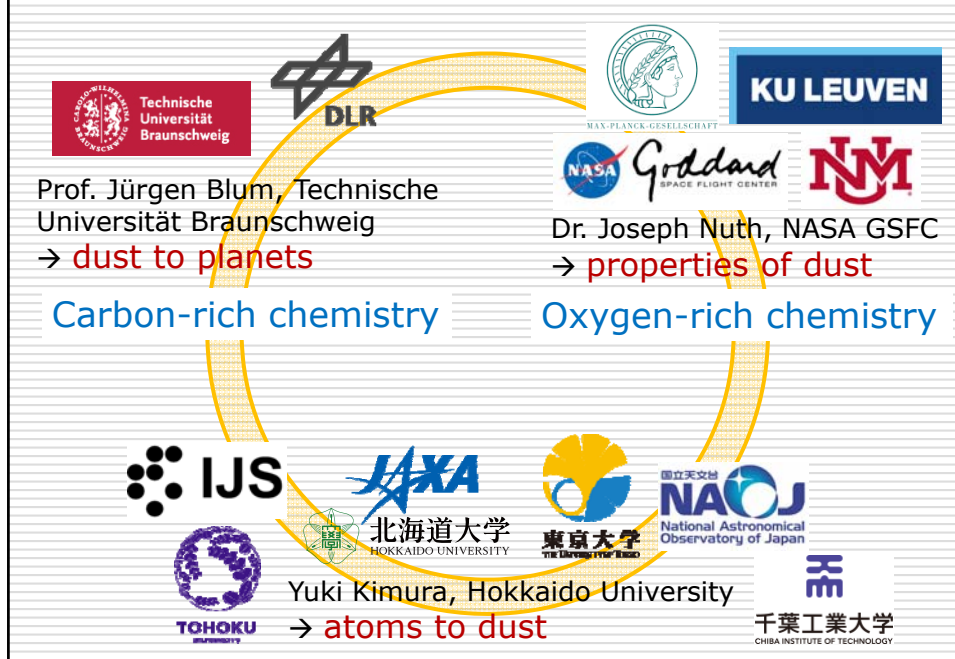
計画の目的

大目的: 137億年の宇宙史における、分子、鉱物粒子(ダスト)、惑星、そして生命へとつながる有機物の形成過程や変遷を、物質科学の視点から理解する。そして、物理、化学の素過程に立脚した揺ぎ無い宇宙物質の創成史を確立する。

本小規模計画の中目的

1. シリケートダストの核生成過程の解明
(酸素リッチ星周のアストロケミストリー)
2. 炭素質ダストの生成過程の解明
(炭素リッチ星周のアストロケミストリー)

International collaboration in DUST



WG採択後の状況

- 2016年12月 宇宙理学委員会WG採択
- 2017 年4月 戦略的基礎開発予算(理学)採択
- 2017年7月 小規模計画採択
- 2017年9月 キックオフ

実現に向けた準備状況(2017年度)

カウンターパートとの打合せ状況

□ 日米協力

- 7月: Nuth氏と会合@札幌
- 10月: J. A. Nuth III 氏(NASA/GSFC)をPIとして、NASAのプログラム “Astrophysics Research and Analysis” に採択！ Title: Grain Formation Processes in Oxygen-Rich Circumstellar Outflows: Testing the Metastable Eutectic Condensation Hypothesis and Measuring Atom-Grain & Grain-Grain Sticking Coefficients (A Sub-orbital Investigation)
- 2月: 米国チームと会合@札幌

□ 日欧協力

- 6月: M. Abrahamsson氏(SSC)と会合@松山
- 7月: 射場の下見とAbrahamsson氏との会合@キルナ
- 7月: K. Sjölander(SSC)と会合@ストックホルム
- 7月: ドイツチームJ. Blum氏(ブラウンシュヴァイツ工科大学)とT. Driebe氏(DLR)と会合@ボン
- 1月: Driebe氏(DLR)と会合@宇宙研(調整中)

実現に向けた準備状況

The screenshot shows the DLR website with the following details:

- Header:** DLR logo and navigation menu (LUFTFAHRT, RAUMFAHRT, ENERGIE, VERKEHR, DIGITALISIERUNG, SICHERHEIT, RAUMFAHRTMANAGEMENT).
- Left Sidebar:** Navigation menu including Missionen, Nachrichten, Multimedia, Standorte, DLR im Überblick, Management, Vorstand, News, Kommunikation, Politikbeziehungen, Strategische Services, Internationale Beziehungen, Diversität im DLR, Leitung der Standorte, and Administration.
- Main Content:**
 - News Section:** "Ausbau der deutsch-japanischen Zusammenarbeit im All" (Expansion of German-Japanese cooperation in space).
 - Article Title:** "Gemeinsame Projekte zu Kosmischem Staub und Verbrennungsmotoren" (Joint projects on cosmic dust and combustion engines).
 - Date:** Donnerstag, 2. November 2017 (Thursday, 2 November 2017).
 - Image:** A group photo of officials from JAXA and DLR standing together, holding documents.
 - Caption:** "JAXA zu Gast beim DLR Raumfahrtmanagement" (JAXA guests at DLR Space Management).
- Right Sidebar:** "Mehr über das DLR" (More about DLR) with a link "Das DLR im Überblick" (Overview of DLR).

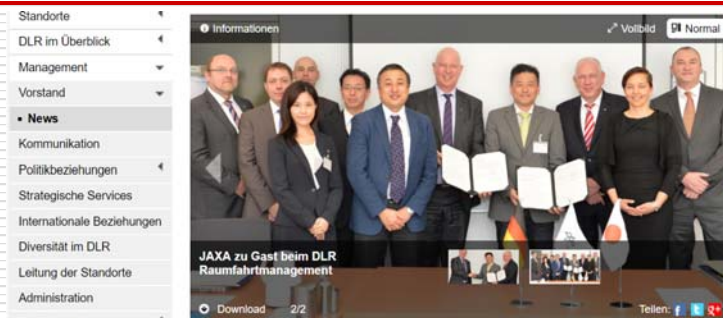
実現に向けた準備状況



Auch in der Schwerelosigkeitsforschung gehen Deutschland und Japan gemeinsame Wege. Hierfür wurden auf dem "Asian Microgravity Symposium" im japanischen Sapporo 2016 zwei Projekte definiert, die 2020 auf einer deutschen **TEXUS**-Höhenforschungsrakete verwirklicht werden sollen.

Bei dem **Projekt DUST** handelt es sich um ein Experiment aus dem Bereich Fundamentalphysik/Astrophysik. Die Hokkaido Universität in Sapporo entwickelt das Experiment gemeinsam mit einem deutschen Team von der Technischen Universität Braunschweig. Die zentrale wissenschaftliche Frage zielt ab auf die Bildung von kohlenstoffreichen Staubpartikeln in der Umgebung von Sternen. Aus diesen Staubpartikeln können sich in der Folge größere planetare Himmelskörper entwickeln. Mit dem Mikrogravitationsexperiment soll die kosmische Staubbildung simuliert werden, um so das bis heute immer noch lückenhafte theoretische Verständnis der Planetenbildung im frühen Sonnensystem entscheidend zu verbessern. Ein Vorgängereperiment hierzu wurde 2015 erfolgreich auf einer japanischen Höhenforschungsrakete durchgeführt. Da ein Mitflug auf TEXUS auch die Bergung der Nutzlast ermöglichen wird, kann gleichzeitig eine technisch verbesserte Version des Experiments geflogen werden.

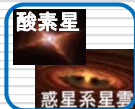
実現に向けた準備状況



Even in weightlessness research, Germany and Japan are working together. For this purpose, two projects were defined at the "Asian Microgravity Symposium" in Sapporo, Japan in 2016, which should be realized **in 2020 on a German TEXUS sounding rocket.**

The **DUST project** is an experiment in the field of fundamental physics / astrophysics. The Hokkaido University in Sapporo is developing the experiment together with a German team from the Technical University of Braunschweig. The central scientific question is aimed at the formation of carbon-rich dust particles in the vicinity of stars. From these dust particles, larger planetary bodies can develop as a result. The purpose of the microgravity experiment is to simulate cosmic dust formation in order to decisively improve the still incomplete theoretical understanding of planet formation in the early solar system. A predecessor experiment on this was successfully carried out in 2015 on a Japanese sounding rocket. Since a flight on TEXUS will also allow the recovery of the payload, a technically improved version of the experiment can be flown at the same time.

計画の目的: 中目的1 (日米協力)



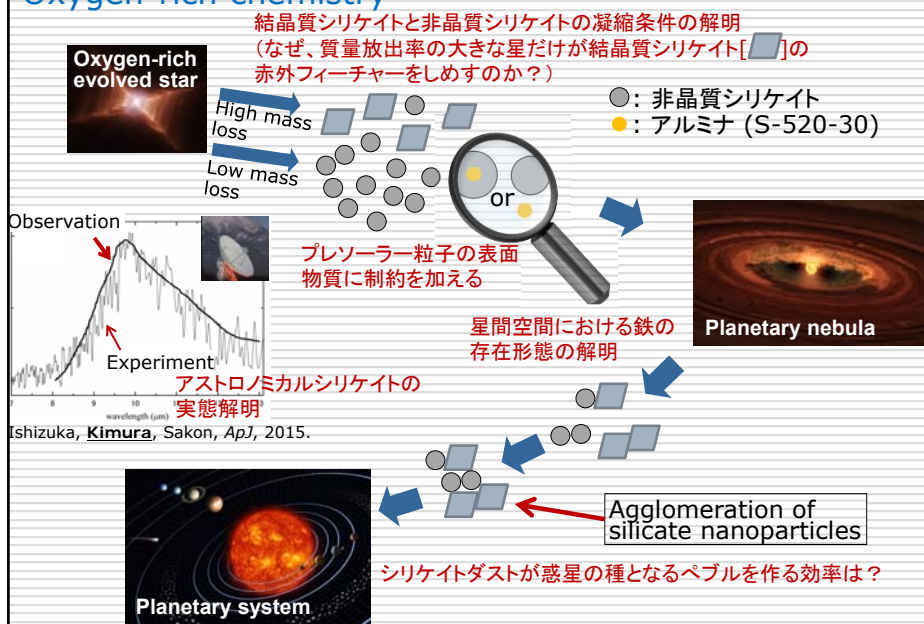
□ シリケート粒子の生成過程の解明

- シリケートは宇宙の至る所に存在しており、地球表層の主要鉱物でもあることから、最も重要な鉱物の一つである。その、核生成過程を理解するために必須の、クラスターからナノ粒子へと成長する過程における構成分子の付着確率や表面自由エネルギーを求め、スペクトル変化から結晶化の初期過程を解明する。



計画の目的: 中目的1 (日米協力)

Oxygen-rich chemistry



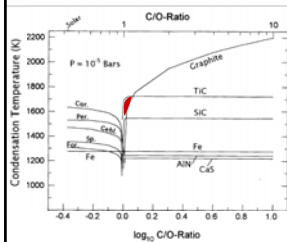
計画の目的：中目的2（日欧協力）

炭素星

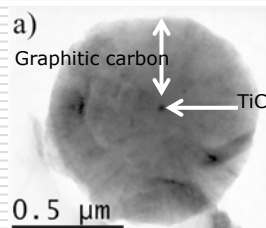


□ 炭素質物質の生成過程の解明

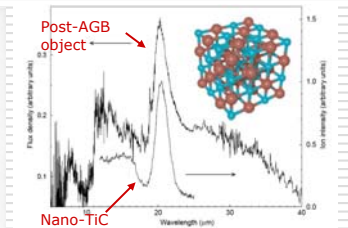
- 炭素や炭化チタンのナノ粒子の物理定数を決定し、コア-マントル粒子の生成条件を解明する。また、炭素星が示す21μmフィーチャーの起源を解明することで、炭素星周囲の物理化学環境の解明につなげる。



Lodders et al., 1995.



Croat et al., 2004.



von Helden, et al. Science, 288 (2000) 313.

候補物質: Nano-TiC, SiC, SiS₂, nanodiamond

核生成の順序、コアとマントルのサイズ

核生成理論により、生成環境が推定されたが、 $J = \alpha \exp[-(16\pi\gamma^3 v^2) / (3\Delta\mu^2 kT)]$ 厚い炭素質層の形成は説明できていない。

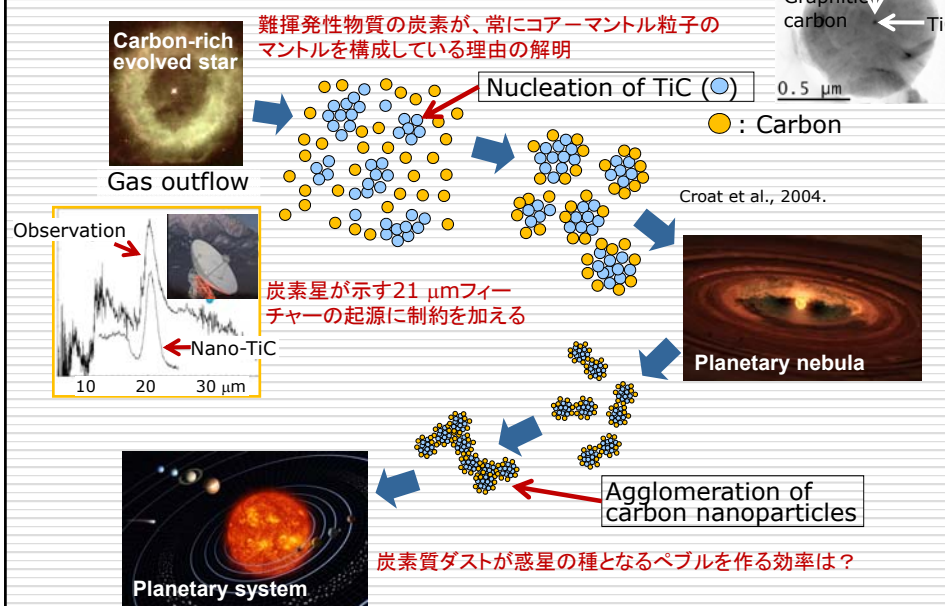
Lodders & Fegley 1995; Sharp & Wasserburg 1995; Chigai et al. 2002; T. Chigai, T. Yamamoto, C. Kaito & Y. Kimura, ApJ, 587 (2003) 771.

α : 付着確率、 γ : 表面自由エネルギー

J : 核生成率、 k : ボルツマン定数、 v : 分子一個の体積、 T : 温度、 μ : ケミカルポテンシャル

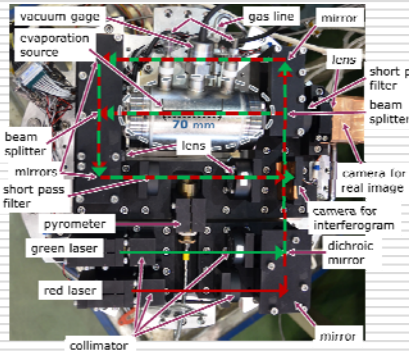
計画の目的：中目的2（日欧協力）

Carbon-rich chemistry



実現手段：搭載装置 (28、30号機を踏襲)

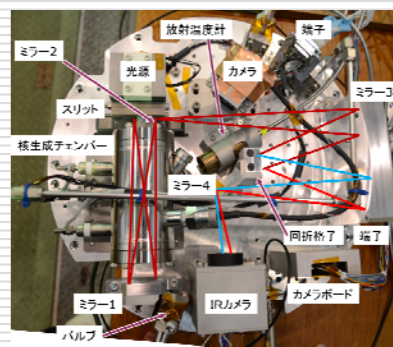
二波長レーザー干渉計



特徴

- 極微量な屈折率変化の検出
- 広視野
- 核生成時の温度と濃度の同時決定

浮遊ダスト赤外線スペクトルその場測定装置



特徴

- 波長分散型で高時間分解能を有する
- 気相状態から結晶化するまで逐次スペクトル取得可能
- スペクトルは天体と直接比較可能

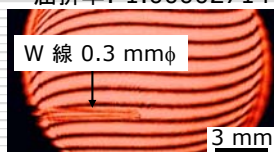
実現手段：搭載装置

二波長レーザー干渉計の特徴

- 極微量な屈折率変化の検出
- 広視野 (10-20Φmm)
- 核生成時の温度と濃度の同時決定

雰囲気ガス: Ar 1×10^4 Pa
 温度: 298 K (25°C)
 屈折率: 1.00002714

温度: 323 K (50°C)
 屈折率: 1.00002503



10^{-6} - 10^{-7} の屈折率変化を捉えられる。

例: 水の屈折率
 N_{H_2O} : 1.333

$$\Delta d = \{(n(T_0, P_0) - n(T, P))\} \times l / \lambda$$

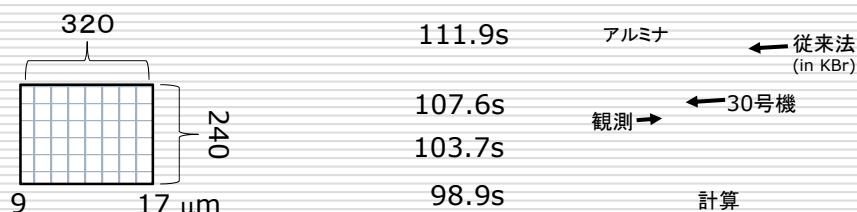
$$n_{Ar(T,P)} - 1 = \frac{[n_{Ar(273.15, P_0)} - 1] P}{1 + a \Delta T} \frac{P}{P_0}$$

a : 体積膨張率
 P_0 : 101333.25 Pa
 Δd : 干渉縞の変位
 l : 屈折率が変わる距離

実現手段：搭載装置

浮遊ダスト赤外線スペクトルその場測定装置の特徴

- 波長分散型で高時間分解能を有する
- 気相状態から結晶化するまでのスペクトル変化を時間を追って取得できる
- 天体と直接比較できるスペクトルの取得



IRアレイカメラ

$$\Delta\lambda \sim 0.03 \mu\text{m}$$

$$\Delta t \sim 0.1 \text{ s}$$

- 液滴経由の核生成
- 10秒かけて結晶化
- α -アルミナの生成

半値幅の再現に成功！

実現に向けた準備状況：本年度の活動

技術課題

1. 光学部品を保護しつつ、その光学部品のクリーニングや交換を行う仕組み **小規模計画で解決**
2. より高精細かつ高速の画像およびデータ取得機構の開発 **小規模計画で進行中**
3. 対象物質がシリケートと炭化チタンに代わることに伴う蒸発源の開発 **基盤SとNASA予算を主に進行中**
4. 赤外線の検出波長領域を30号機の9-17 μm から、長波長側に広げる
8-30 μm (より野心的には40 μm)

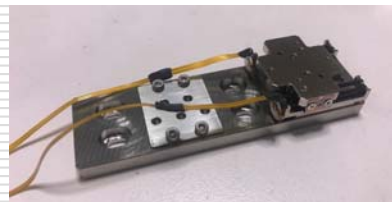
戦略的基礎開発予算(理学)で解決

実現手段：搭載装置の現状

拡張性を持ったチェンバー



試料採取機構



本年度の成果

1. Yuki Kimura, Sample recovery of microgravity experiments using sounding rockets opens up new sciences, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Chiba, Japan, May 23, 2017.
招待講演
2. Yuki Kimura, Shinnosuke Ishizuka, Itsuki Sakon, Tomoya Yamazaki, Kyoko K. Tanaka, Shinsuke Takeuchi, Yuko Inatomi, Microgravity Experiments to Understand Cosmic Dust Formation in the Gas Outflow from Oxygen-Rich Stars, 31st International Symposium on Space Technology and Science, Matsuyama, Japan, June 9, 2017.
3. Yuki Kimura, What determines a nucleation pathway?, The 21st American Conference on Crystal Growth and Epitaxy, Santa Fe, New Mexico, USA, July 31, 2017.
招待講演
4. Yuki Kimura, Formation processes of nano-minerals via nucleation in vapor, Goldschmidt 2017, Paris, France, August 18, 2017.
5. Yuki Kimura, Early stages of grain formation studied by microgravity experiments, 24th Congress and General Assembly of the International Union of Crystallography, Hyderabad, India, August 27, 2017.
6. 木村勇氣, 煙ってなあと, 第26回先端科学移動大学2017(高等学校訪問授業), 旭川南高等学校、旭川, 2017年11月10日. **出前授業**
7. 木村勇氣, ナノ粒子特有の振る舞いから宇宙の謎に迫る, 第26回先端科学移動大学2017, 旭川市科学館「サイパル」、旭川, 2017年11月11日. **市民講座**
8. 木村勇氣、Joseph Nuth、Jürgen Blum、田中今日子、野沢貴也、左近樹、田中秀和、木村宏、山崎智也、渡部直樹、香内晃、Saso Sturm、Nirmal Kuma Velu、竹内伸介、松原英雄、稲富裕光, 小規模計画「DUSTの核生成」初年度活動報告, 第18回宇宙科学シンポジウム, 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、相模原, 2018年1月10日.
9. 木村勇氣、**日本学術振興会賞**、ナノ領域の特異性を取り入れた結晶化初期過程の解明とその天文学への応用、2018年2月7日.