

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25610037

研究課題名(和文) 星周高温低圧条件での金属鉄均質核形成実験

研究課題名(英文) Homogeneous nucleation of metallic iron in circumstellar environments

研究代表者

橘 省吾 (Tachibana, Shogo)

北海道大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50361564

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：ダストは恒星の誕生から死、惑星系形成、銀河化学進化と様々な局面で重要な役割を果たす。星周環境でのダスト形成解明には、形成過程の速度論的理解が不可欠である。制御された星周条件での鉱物成長実験の手法を応用し、星周温度・圧力条件を制御・再現した金属鉄均質核形成実験をおこない、星周条件での金属鉄均質核形成速度および臨界過飽和比を得ることを目的とし、高温真空加熱装置の設計、開発をおこなった。作成した装置は到達真空度10-4Pa、最高到達温度1500 と設計通りの性能を示し、星周環境での金属鉄凝縮実験をおこなうことが可能となった。

研究成果の概要(英文)：Dust grains form in circumstellar environments, and play important roles in star formation, planetary system formation, and galactic chemical evolution. It is important to understand the kinetic aspect of dust formation processes, especially the vapor growth kinetics of dust. In this study, we developed a new vacuum furnace to simulate homogeneous nucleation and growth of metallic iron dust in circumstellar environments.

研究分野：惑星物質科学

キーワード：金属鉄 ダスト 晩期型星 原始惑星系円盤 均質核形成

1. 研究開始当初の背景

晩期型星周でつくられるダストは、金属元素の担体として銀河の化学進化に寄与し、ダストの輻射や吸収は、星形成時の冷却、原始惑星系円盤の熱構造、晩期型星質量放出風の加速にも影響を与える。ダストは宇宙での構造形成・化学進化に関わる様々な局面で重要な役割を果たす。

時間変化する星周環境でのダスト形成の解明には、形成過程の速度論的理解が不可欠である。気相中ダスト形成は、均質核形成およびその後の核の成長の二段階からなり、前者においては核形成の臨界過飽和比および核形成頻度、後者では気相分子の凝縮係数(付着確率)が重要で、これらの値によって、ダスト形成時間、種類、サイズ、数密度は変化する。しかし、現状、理論研究では、実験と数値合わない場合もある古典的均質核形成頻度が用いられ、凝縮係数が1と仮定されたりしている (e.g., Ferrarotti & Gail 2001; Gail 2004)。気相中ダスト均質核形成実験も実施されているが (e.g., Toppanni et al. 2006; Brucato & Nuth 2010)、星周条件 (10⁻⁵-10⁻⁹ atm) より高圧 (~10⁻² atm) であり、また、ケイ酸塩や金属鉄の均質核形成頻度は得られていない。木村ら (2012) は亜鉛の均質核形成実験で、表面エネルギーと均質核形成時の凝縮係数を求めたと報告したが、実験条件は高圧で、ガスの温度分布が不明であり、一般化が難しい。

申請者は星周でのダスト形成環境を再現・制御した温度圧力条件で、主要鉱物の基板上への凝縮実験(核の成長を模擬)をおこない、金属鉄成長に関する凝縮係数が1であることや基板上での不均質核形成が過飽和比 10 程度でも起こることを示した (Tachibana et al. 2011)。主要酸化物やケイ酸塩については、酸化アルミニウムの凝縮係数が結晶方位に依存して、0.03-0.09 の値をとることを示し (Takigawa 2012)、マグネシウムケイ酸塩の凝縮係数が 0.05 以下であることを明らかにしつつある (Tachibana et al. in prep.)。制御された星周条件での主要ダスト鉱物の成長実験をおこなっているのは申請者らのグループのみであり、本研究ではこれらの実験 (特に Tachibana et al. (2011)) を発展させ、星周温度・圧力条件を再現した金属鉄均質核形成実験をおこなう。

2. 研究の目的

ダストは恒星の誕生から死、惑星系形成、銀河化学進化と様々な局面で重要な役割を果たす。星周環境でのダスト形成解明には、形成過程の速度論的理解が不可欠である。ダスト候補物質の均質核形成実験はおこなわれてきたが、実験上の問題で星周環境に直接応用するのが難しい。本研究では、申請者が

おこなってきた制御された星周条件での鉱物成長実験の手法を応用し、星周温度・圧力条件を制御・再現した金属鉄均質核形成実験をおこない、星周条件での金属鉄均質核形成速度および臨界過飽和比を得る。得られた核形成パラメータを用いて、晩期型星周、原始惑星系円盤条件での金属鉄ダスト形成挙動(形成温度圧力条件、均質核形成による単一ダスト形成/前駆ダスト(酸化物・ケイ酸塩)上での不均質核形成による複合ダスト形成など)を明らかにする。

特に以下の項目に関し、実施、解明することをめざす。

- (1) 制御された温度・圧力・過飽和条件で金属鉄均質核形成実験をおこなうシステムを作成する。
- (2) 星周条件での金属鉄均質核形成頻度および臨界過飽和比を得る。
- (3) 均質核形成・不均質核形成両者を考慮し、星周環境で金属鉄が単一ダストとして形成されるか、ケイ酸塩などとの複合ダストとして形成されるかを明らかにする。

3. 研究の方法

金属鉄均質核形成実験装置の開発をおこなう。Tachibana et al. (2011) では基板上での金属鉄成長実験において、アルミナ管底部に設置した金属鉄ペレットを真空炉内で加熱し、集束して放出される鉄蒸気を低温部の基板上で凝縮させる実験をおこなった (図 1)。



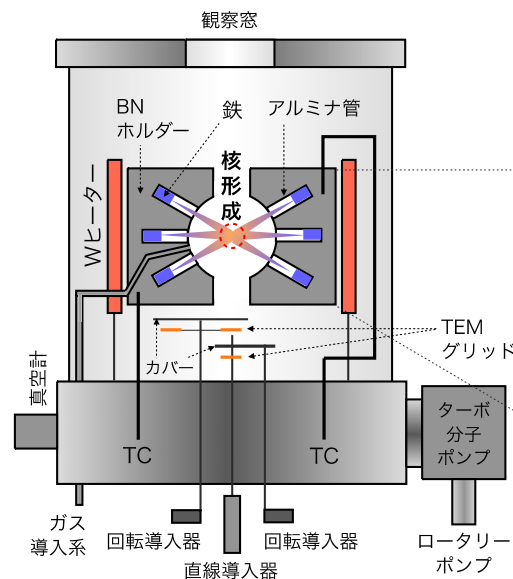
図 1: Tachibana et al. (2011)での金属鉄凝縮実験セッティング。金属抵抗加熱真空炉内部を上から撮影。右側のリング上構造がタングステンメッシュヒーター。左側の金属層はリフレクタでヒーターからの輻射を反射する。金属鉄を入れたアルミナ管は自作のグラフィット台座に設置する。アルミナ管を通して、放出された鉄蒸気は、リフレクタの穴から外に放出され、同様に低温部のリフレクタの穴部に吊された基盤上に凝縮する。右下からヒーター中央に伸びているのは温度制御用熱電対。

管から放出されるガスフラックスの空間分布が理論的考察 (Dayton 1956) と一致することは確認されており (e.g., Guevremont et al. 2000; Tachibana et al. 2011), この手法を用いて鉄蒸気圧の空間分布 (= 過飽和比の空間分布) を制御し, 局所的に過飽和条件を作成する (図 2)。



図 2: 複数ガス源からの原子ビームの収束による過飽和環境作成のコンセプト図。

金属鉄均質核形成実験装置のコンセプト図を以下に示す (図 3)。



1000-1300 K; 過飽和比: 1-30

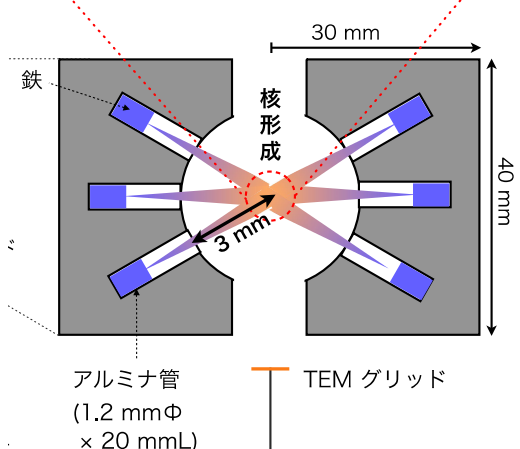


図 3: 金属鉄均質核形成実験装置概念図。

一端閉じアルミナ管 (外径 1.2 mm, 内径 0.8 mm, 長さ 20 mm) に金属鉄ペレットを入れ, 円筒形の窒化ホウ素ホルダー (直径 60mm, 高さ 40mm, 二分割仕様) に円周状に複数本 (最大 60 本) セットし, ガス源とする。

窒化ホウ素ホルダーを SUS 製真空チャンバーに設置し, タングステンヒーターで加熱する。ホルダーは複数の熱電対で温度をモニターする。晩期型星周や原始惑星系円盤での金属鉄形成を模擬するため, 1000-1300 K まで上がるヒーターシステムとする。

セットするガス源アルミナ管の本数に応じ, 窒化ホウ素ホルダー中央の直径 6 mm の球状空間の中央約 1 mm の空間に過飽和比 1-30 程度の幅広い過飽和条件を制御してつくりだすことができる。また, 本研究の条件において, ガス源の金属鉄は百時間以上, ガスを供給することが可能であるため, 実験時間は充分長く確保できる。

実験装置には水素ガスを導入する機構も設け, 10^{-5} - 10^{-7} atm 程度の水素存在下での実験もおこなう(水素圧 10^{-5} - 10^{-7} atm の条件では, 窒化ホウ素ホルダー中央部で分子流条件が成立)。水素は宇宙空間で最も豊富に存在するガスであり, 10^{-5} - 10^{-7} atm 程度の水素ガスは晩期型星周や原始惑星系円盤の典型的圧力に近い。宇宙空間での均質核形成を模擬することになる。水素ガスは窒化ホウ素ホルダーに空けた穴を通して, 窒化ホウ素ホルダー中央部に放出する。ホルダーの穴内部に白金メッシュなどを入れ, 水素ガスとホルダーとの熱交換効率を上げ, 水素ガス温度を鉄蒸気温度と等しくする。水素ガスは, 核形成によって発生する潜熱を受け取る役割を果たす可能性もあり, 水素ガスの有無で実験結果を比較する。

形成・成長した粒子はアルミホルダー下部に設置した透過電子顕微鏡 (TEM) 用グリッドで二つの方法で捕集する。(1) 回転導入器に複数のグリッドを設置し, 一定時間ごとに回転させ, 核形成・成長領域から落下する粒子を捕集する。(2) 直線導入器に設置したグリッドを, 実験終了時に核形成・成長領域に移動させ, 捕集する。

4. 研究成果

真空加熱装置設計をおこない, 装置を作成した。設計・製作を依頼した A 社と仕様・予算の点で調整が付かず, (株) アルバックに改めて, 依頼をおこない, 製作した。そのため, 装置完成が遅れることとなった(アルバック社特型・図 4)。チャンバーはこれまでの真空高温実験の経験を活かし, 大型チャンバーからの試料の出し入れを簡略化する工夫をおこなった。また, 現有のターボ分子ポンプ, 油回転ポンプなどを利用し, 装置を完成

させた。



図 4：作成した真空高温加熱装置（アルバック社特型）。

作成した真空高温加熱炉は到達真空度が 10^{-4} Pa，最高到達温度は 1500 であり，設計どおりの装置の作成に成功した。

窒化ホウ素ホルダーの設計，作成もおこなった。製作の簡便さから，窒化ホウ素を使わずにグラファイトで作成することに変更し，作成した。金属鉄の蒸発実験の試験をおこない，金属鉄蒸発が問題なく起こることを確認した。

装置設計・作成と並行して，集束ビームイオン加工装置を用いた微粒子試料加工，ならびに走査型透過電子顕微鏡（日立 HD-2000）を用い，微粒子観察のための手法作成もおこなった。

これらの結果の一部については，台湾でおこなわれた The Life Cycle of Dust in the Universe 会議での招待講演などで紹介したほか，Tachibana and Takigawa (2014) Experimental Studies on Dust Formation in Space, Proceedings of Science (Life Cycle of Dust in Universe) (宇宙環境でのダスト形成速度論実験のレビュー)などの論文で報告をおこなった。

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 3件)

Takigawa A., Tachibana S., Nagahara H. and Ozawa K. (2015) Evaporation and condensation kinetics of corundum: The origin of the 13- μ m feature of oxygen-rich AGB Stars, *Astrophys. J. Suppl.*, 218, doi:10.1088/0067-0049/218/1/2 (査読有り)

Tachibana S. and Takigawa A. (2014) Experimental Studies on Dust Formation in Space. *Proceedings of "The Life Cycle of Dust in the Universe: Observations, Theory, and Laboratory Experiments"* PoS(LCDU2013)046. (査読無し)

Takigawa A., Tachibana S., Huss G. R., Nagashima K., Makide K., Krot A. N. and Nagahara H. (2013) Morphology and crystal structures of solar and presolar Al₂O₃ in unequilibrated ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 124, 309-327. (査読有り)

〔学会発表〕(計 3件)

Tachibana S. (2014) Experimental Studies on Dust Formation in Space. The Life Cycle of Dust in the Universe (招待講演), 2013/11/18-11/23, Taipei, Taiwan.

橋 省吾 (2014) 太陽系の進化をさぐる物質化学:「はやぶさ2」サンプルリターン・室内実験。首都大学東京研究環シンポジウム:宇宙の化学進化 2014 (招待講演)。2014/1/29-1/30, 首都大学東京。

橋 省吾 (2013) 初期太陽系化学進化:隕石の化学的多様性と地球型惑星。理論天文学研究会 2013 (招待講演), 2013/10/23-10/25, 湯河原ホテル四季彩。

〔図書〕(計 1件)

橋 省吾 (2014) "太陽系の元素は銀河系から" 宇宙と生命の起源 2 ~ 素粒子から細胞へ (岩波ジュニア新書) (小久保英一郎・嶺重慎編), 岩波書店, pp.256.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況 (計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
<http://shogotachibana.webnode.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橘 省吾 (Shogo Tachibana)
北海道大学・理学研究院・准教授
研究者番号：50361564

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし