

令和 3 年 6 月 3 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05631

研究課題名(和文) 焼結ダストアグリゲイトから惑星はできるか？室内実験と数値実験による衝突現象の解明

研究課題名(英文) Is planetary formation possible from sintered aggregates? Laboratory experiment and numerical simulation

研究代表者

城野 信一 (SIRONO, Sin-iti)

名古屋大学・環境学研究科・准教授

研究者番号：20332702

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：ダストアグリゲイトの力学物性は、惑星形成の初期段階に大きな影響を与える。弾性率が大きくなると、衝突した際に変形することができず跳ね返ってしまい、微惑星形成が阻害されることが指摘されている。弾性率が增大する要因としては焼結があげられる。そこで本研究では、室内実験と数値シミュレーションにより、ダスト微粒子間のバネ定数が焼結によりどう変化するのかを明らかにした。従来のモデルとの差がダストアグリゲイトの衝突にどのような影響を与えるのか明らかにするために、ダストアグリゲイトの衝突シミュレーションを行なった。その結果、衝突の結果に顕著な差は見られなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

焼結したダストアグリゲイトの弾性率を明らかにし、その結果をもとにして数値シミュレーションを行なったところ、衝突の結果が合体から跳ね返りに転じる可能性が非常に高くなることが明らかとなった。ここから、惑星は焼結が起こらない領域でのみ形成しうると考えられる。惑星の形成場所が焼結によって決定さうということは、原始惑星系円盤の観測結果からも示唆されている。

研究成果の概要(英文)：Mechanical properties of dust aggregates strongly affect the first step of planetary formation. If elasticity of an aggregate is large, the collisional outcome of aggregates becomes bouncing and growth to planets is prohibited. In this study, elasticity between dust grains was determined as a function of the degree of sintering, which is an efficient mechanism in a protoplanetary nebula. There are four modes of deformation: 1: stretching 2: rolling 3: sliding 4: stretching. The determined elasticity for stretching was smaller than that in previous model. Empirical formulas were derived for the elasticities. The collisional simulation was conducted to check the effect of the modified elasticity. The collisional outcome of numerical simulation was not changed.

研究分野：惑星科学

キーワード：ダストアグリゲイト 焼結 微惑星 形成場所

## 1. 研究開始当初の背景

惑星形成は、大きさ 0.1 ミクロ程度のダスト微粒子からなる集合体(以下、ダスタグリゲイトとする)の衝突合体で開始する。従って惑星形成過程が進行するためには、ダスタグリゲイトが衝突したときに合体する必要がある。太陽からある程度離れた領域では温度が低いため、ダスタグリゲイトの主成分は氷となる。氷のような揮発性物質からなるダスタグリゲイトでは、温度がある程度上昇すると焼結とよばれる現象が起こる。昇華した水蒸気がダスト微粒子の接触部に再凝縮することで、微粒子の結合が強固になり、ダスタグリゲイトの弾性率が上昇する。ダスタグリゲイトの弾性率が上昇すると、変形によって運動エネルギーを散逸させることができなくなるため、ダスタグリゲイトは衝突しても跳ね返ってしまうことが Sirono and Ueno(2017)で示された。これは惑星形成を大きく左右する重要な発見であるが、その数値シミュレーションで用いられた微粒子結合部のモデルは単純化されており検討が必要であった。

## 2. 研究の目的

そこで本研究課題においては、室内実験と数値シミュレーションにより微粒子結合部のバネ定数を決定し、そのバネ定数を Sirono and Ueno(2017)のシミュレーションに組み込むことで、焼結したダスタグリゲイトから惑星形成がスタートしうるのであるのかどうかを明らかにする。

## 3. 研究の方法

### 3-1: 室内実験

焼結が進行した際、微粒子の結合部の形状がどのように変化するかは Sirono (2011)において明らかにされている。この形状データを用いて、樹脂を削りだすことで模擬微粒子結合部を作成した。万能試験機を用いてこのサンプルに荷重をかけ、どの程度変形するのかを計測した。結合部の変形には 1: 伸び縮み 2: 曲げ 3: すべり 4: ねじり の 4 モードが存在するが、実験系の都合上 1: 伸び縮み モードについてのみ計測を行った。

### 3-2: 数値シミュレーション

フリーソフト FreeCAD を用い、微粒子結合部を再現する 3 次元メッシュを作成した。このメッシュに、有限要素法シミュレーションソフト Calclix を用いて荷重を加え、変形量を算出した。数値シミュレーションでは、4 つ全ての变形モードについてバネ定数の算出を行った。

### 3-2: アグリゲイト衝突シミュレーション

3-1, 3-2 で計測したバネ定数を用い、Sirono and Ueno (2017) と同一の数値シミュレーションを行った。

## 4. 研究成果

### 4-1: バネ定数の計測結果

図 1 に、室内実験と数値シミュレーションの結果(伸び縮みモード)を示す。これをみると、室内実験と数値シミュレーションの結果は整合的であることがわかる。Sirono and Ueno(2017)の結果と比較すると、Sirono and Ueno(2017)の単純化されたモデルではバネ定数を過大評価していることが見て取れる。これは、Sirono and Ueno(2017)のモデルにおいては結合部のみ変形し、ダスト微粒子本体は剛体と取り扱われていたためである。また、室内実験と数値シミュレーションの結果は半解析解(直線)でよく表されることがわかる。

一方で曲げモードの結果は、Sirono and Ueno(2017)のモデルとそれほど大きな差が無いことが図 2 からわかる。これは、曲げにおいては、変形は結合部に集中しているためである。またこのモードについても室内実験と数値シミュレーションの結果は半解析解(下の曲線)でよく表されることがわかる。

以上で明らかになったバネ定数を Sirono and Ueno(2017)の数値シミュレーションコードに取り入れてダスタグリゲイト衝突のシミュレーションを行った。図 3 に示される通り、今回計測したバネ定数を用いても以前の結果とほぼ変わらないことがわかった。これは、ダスタグリゲイ

トの変形は曲げのモードでおこっており，曲げモードのバネ定数がそれほど変化していないためである．

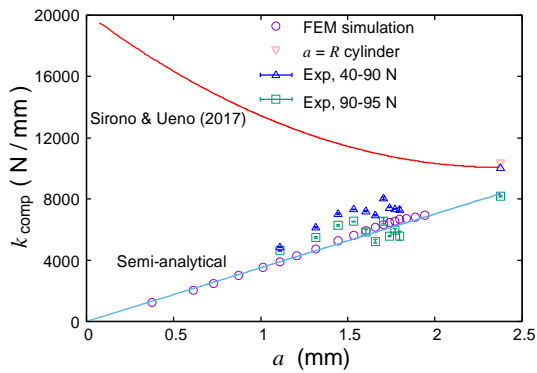


図 1：結合部半径の関数としての伸び縮みモードのバネ定数．丸印：数値シミュレーション 四角と三角：室内実験 上の曲線：Sirono and Ueno(2017)のモデル 下の直線：半解析解．下向き三角：円柱形状に対するシミュレーション結果．

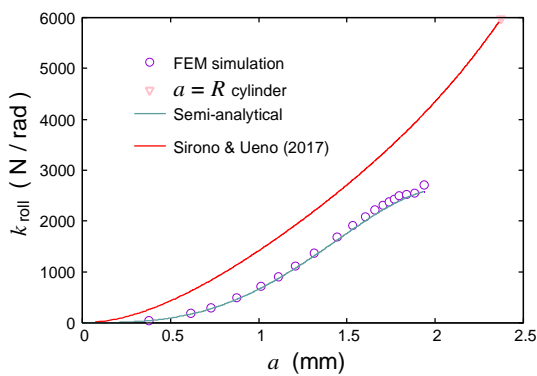


図 2：結合部半径の関数としての曲げモードのバネ定数．丸印：数値シミュレーション 上の曲線：Sirono and Ueno(2017)のモデル 下の曲線：半解析解．下向き三角：円柱形状に対するシミュレーション結果．

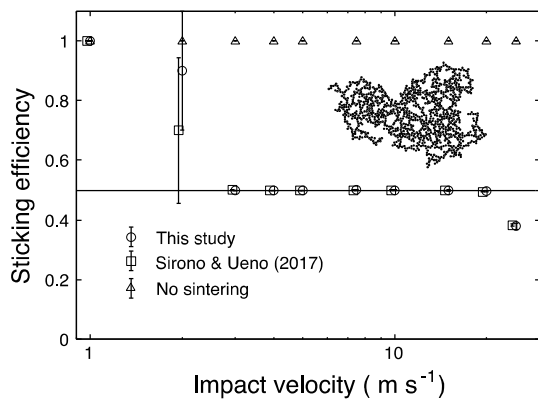


図 3：ダストアグリゲイト衝突シミュレーションの結果．縦軸は合体効率，横軸は衝突速度．丸印：本研究 四角：Sirono and Ueno(2017)の結果．三角：焼結していない場合．

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sirono, S. and Ueno, H.	4. 巻 841
2. 論文標題 Collisions between sintered icy dust aggregates	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 36
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/aa6fad	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sirono, S.	4. 巻 842
2. 論文標題 Heating of porous icy dust aggregate	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/aa7389	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sirono, S. and Kudo, D.	4. 巻 911
2. 論文標題 Elasticity of a Sintered Contact between Dust Grains	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 114
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/abec7c	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 城野信一
2. 発表標題 球間焼結ネックの弾性定数
3. 学会等名 日本惑星科学会2019年秋季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sin-iti Sirono
2. 発表標題 Chondrule formation through collisions of rocky and icy planetesimals
3. 学会等名 42 nd COSPAR Scientific Assembly (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 城野信一
2. 発表標題 高空隙率ダストアグリゲイトの温度上昇
3. 学会等名 JpGU-AGU Joing meeting 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 城野信一
2. 発表標題 スノーライン近傍におけるコンドリュールの形成
3. 学会等名 日本惑星科学会2017年秋季講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	桂木 洋光  (Katusragi Hiroaki)  (30346853)	大阪大学・理学研究科・教授    (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------