

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13602

研究課題名(和文) 原始惑星系円盤流体計算による氷ペブル集積効率と地球型惑星の水量決定機構の解明

研究課題名(英文) Revealing icy pebble accretion and water content of terrestrial planets by hydrodynamic simulations of protoplanetary disks

研究代表者

黒川 宏之 (Kurokawa, Hiroyuki)

東京工業大学・地球生命研究所・特任助教

研究者番号：80713643

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、新しい惑星形成シナリオであるペブル集積モデルのもとで、惑星周囲の原始惑星系円盤ガス流を考慮した氷ダスト(ペブル)の集積効率を求め、地球型惑星の水量決定機構を解明することであった。そのために、惑星周囲の原始惑星系円盤ガス流の流体シミュレーション、流入ペブルの軌道計算、原始惑星系円盤におけるダスト進化と惑星へのペブル集積計算を行った。研究実施計画に基づいて研究を行い、惑星サイズに応じた惑星周囲の原始惑星系円盤ガス流の構造、ペブルサイズに応じた惑星へのペブル集積効率を理論的に求め、それらをもとに氷ペブルによる地球型惑星への水供給量を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、地球のような生命を育む惑星がどのように誕生しうるのかという問いの解明へと繋がるものである。我々はどこからきたのか、我々は宇宙において孤独な存在なのかという根源的な問いは、人類が地球外の世界、太陽系や系外惑星系を知ろうとする動機となってきた。惑星系の形成過程についての理解が大きく変わりつつある現在、その新しいシナリオのもとで惑星の水量がどのように決定されるのかを解明したことは、将来の太陽系探査や系外惑星系観測への指針を与えうるものであり、学術的・社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study was to determine the accretion efficiency of icy dust (pebbles) under a new planet formation scenario, the pebble accumulation model, taking into account the gas flow around a planet in a protoplanetary disk, and to elucidate the mechanism to determine the water content on terrestrial planets. For this purpose, we performed hydrodynamic simulations of the protoplanetary disk gas flow around the planet, orbital calculations of incoming pebbles, and calculations of dust evolution in the protoplanetary disk and pebble accretion on the planet. Based on the research plan, we obtained the structure of the protoplanetary disk gas flow around the planet as a function of the planetary mass, the efficiency of pebble accretion depending on the pebble size, and the amount of water supplied to the terrestrial planets by icy pebbles.

研究分野：惑星科学

キーワード：惑星科学 惑星形成 原始惑星系円盤 流体計算 系外惑星 惑星起源・進化 地球 ハビタビリティ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

地球型惑星の辿る運命を理解する上で、惑星の保持する水量の決定要因を解明することは重要な課題である。生命の誕生において、液体の水の存在はその必要条件として考えられている。水の有無からさらに踏み込むと、地球型惑星の海水量は大陸と海洋の比率を通じて惑星表層の気候に重大な影響を及ぼす。惑星内部の含水量はマントル物性を通じて熱史にも影響を及ぼすことが知られている。

ところが、地球型惑星に水をもたらした機構、及び水量の決定要因は未解明の謎である。従来の惑星形成理論では、地球型惑星は現在の軌道付近に存在した材料物質から集積するため、水に枯渇した状態で誕生する。そこで有力視されてきた水の供給源は、遠方領域に存在する水に富んだ小惑星や彗星である。これらの小天体が木星などの巨大ガス惑星の重力によって散乱されることで、地球型惑星に衝突し水を供給する。

これに対し、2010年代になって提唱された新しい惑星形成理論-ペブル集積モデルでは全く異なる水供給機構が存在する。ペブル集積モデルでは、cm サイズまで成長したダスト(ペブルと呼ばれる)がガス抵抗を受けて角運動量を失うことで、中心星方向に落下していく。原始惑星はこのペブルを集積することで成長する。ペブル集積モデルにおいては、惑星形成期に遠方からもたらされる氷に富んだペブルを集積することによって水を獲得する。この氷ペブル集積による水供給量は、地球海水量の約 100 倍以上にもなりうる。これはすなわち、地球のような僅かな水を持った惑星をつくることは困難であるという、惑星形成理論の新たな問題を提示している。

2. 研究の目的

氷ペブル集積による水過剰問題はいかに回避されたのか？地球やその他の地球型惑星の水量はどのような機構で決定されたのか？これが本研究で解明したい問いであった。

本研究では新たに、水過剰問題を回避する機構として、惑星重力が駆動する原始惑星系円盤ガス流による氷ペブル集積の抑制という機構を提案・検討した。大局的には円盤ガスの流れ場はほぼケプラー回転であるが、惑星近傍においては、ガスは惑星の極方向から流入し赤道面から流出する。研究代表者らの予備的なシミュレーションの結果、この流出ガスの速度はペブル流入速度を上回る場合があることが判明したため、惑星へのペブル集積を妨げると期待された。

本研究の目的は、惑星周囲の原始惑星系円盤ガス流が氷ペブルの集積効率に及ぼす影響を明らかにすることであった。さらに、惑星サイズやペブルサイズなどのパラメータに対する集積効率の依存性を調べ、最終的に、地球型惑星の水量決定機構を解明することであった。

惑星重力の駆動する 3 次元的なガス流とペブルの相互作用に着目した研究は世界初であり、本研究の独自性のある点であった。従来の研究では、惑星の駆動するガス流の影響は無視されるか、2 次元的な流れのみ考慮した限定的なものであった。本研究の主目的は氷ペブルの集積と水供給に特化したものであるが、本研究で解明した 3 次元的なガス流とペブルの相互作用は、地球型惑星そのものの形成過程である岩石ペブル集積にも応用可能であり、研究の発展性がある。

3. 研究の方法

本研究は 3 段階に分けて行われた。

- (1) 惑星周囲の原始惑星系円盤ガス流の流体シミュレーション、
- (2) 惑星が駆動するガス流による抵抗を考慮した流入ペブルの軌道計算、
- (3) 氷ペブルによる地球型惑星への水供給量の推定と水の起源の制約、である。

(1) 惑星重力が駆動する原始惑星系円盤ガス流の流体シミュレーション

惑星周囲の原始惑星系円盤ガスの 3 次元流体力学シミュレーションを行うことで、惑星重力が駆動する流れ場を求めた。惑星軌道に乗った回転座標系かつ、惑星を原点においた 3 次元極座標系において、非等温・圧縮性流体の方程式を積分した。流体力学シミュレーションには、宇宙物理学用流体力学シミュレーションコード Athena++を使用した。

流入ペブルの運動に影響を及ぼすと期待される、惑星の極方向から流入し赤道面から流出するガスの流れ場・速度について、惑星質量やガス温度、ガス密度といったパラメータ依存性を明らかにする。特に、惑星重力によって駆動される流入・流出ガスの速度は、惑星質量が大きいほど大きくなるのが解析的な検討から予想されているため、惑星質量への依存性について重点的に調べる。

(2) 流入ペブルの軌道計算と集積効率の見積もり

惑星が駆動する流れ場の中でのペブルの軌道を計算した。惑星軌道に乗った回転座標系において、ペブルは慣性力・惑星重力・ガス抵抗の力を受けて運動する。ペブルの軌道計算について

は多くの先行研究があり、これらの手法を導入した。本研究の独自の要素として、研究1の3次元流体シミュレーションの結果をガスの流れ場として使用した。

赤道面において流出するガス流はペブル集積を妨げる。小さいペブルはガス抵抗力の影響を受けやすい一方で、大きいペブルは赤道面-すなわちガス流出流域に濃集しやすい。ペブルサイズごとの集積効率を求めた。

(3) 氷ペブルによる地球型惑星への水供給量の推定と水の起源の制約

研究(2)で得られた惑星質量・ガス温度・ガス密度・ペブルサイズの関数としての氷ペブル集積効率をもとに、惑星形成期を通じて氷ペブルがもたらす水量を求めた。惑星形成理論の予想するダスト成長やペブル落下の知見をもとに、惑星形成期の各時刻のペブル流入フラックスを仮定した。ペブル流入フラックスに氷ペブル集積効率を掛けて時間的に積分することで、各軌道における地球型惑星への氷ペブルの水供給量を計算した。

最終的に、地球型惑星に水をもたらした機構と水量の決定要因を解明した。現在の地球及びその他の地球型惑星の全水量の見積もりと、氷ペブルのもたらす水量の比較から、氷ペブル・小天体それぞれの寄与の割合を求めた。そして、惑星形成期の氷ペブル集積と、惑星形成後の小天体衝突のどちらが支配的かを判別した。

4. 研究成果

惑星重力がつくり出す流れ場は大気の温度構造に依存し、現実的な非等温の計算では、惑星周囲に流れ場から孤立した大気が形成されることがわかった。大気の周囲には円盤ガスの流れ場が存在し、大局的にはシアー流・ホースシュー流・リサイクリング流に分類される。リサイクリング流の速さは惑星質量に依存することを突き止め、惑星質量の関数として記述する解析解を導いた。

惑星重力がつくり出す流れ場の中でのペブル集積効率を惑星質量とペブルサイズの関数として求めた。また、惑星重力がつくり出す流れ場の中でのペブル集積は、ガスの流れ場・ペブル集積のそれぞれについて、向かい風とシアー流のどちらが支配的であるかに応じて、4通りの形態に分類できることがわかった。どの形態に属するかは惑星質量やペブルサイズに依存する。

最後に、上述のペブル集積効率を用いて、原始惑星系円盤の中で成長する氷ダストが地球型惑星にもたらす水量を様々な惑星質量や初期円盤サイズについて求めた。その結果、惑星重力がつくり出す流れ場による氷ペブル集積の抑制が生じるかに依存して、水量が大きく二分することがわかった。その結果、地球のようなほどよい水量を氷ペブル集積から獲得するケースは限定的であることを突き止めた。このような振る舞いは、従来考えられていた小惑星・彗星による水供給とは異なるため、将来の系外惑星観測で惑星の水量の分布が得られれば、支配的な水供給過程を制約できる可能性を示唆している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kurokawa H., Ehlmann B. L., De Sanctis M. C., Lapotre M. G. A., Usui T., Stein N. T., Prettyman T. H., Raponi A., Ciarniello M.	4. 巻 125
2. 論文標題 A Probabilistic Approach to Determination of Ceres' Average Surface Composition From Dawn Visible Infrared Mapping Spectrometer and Gamma Ray and Neutron Detector Data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Planets	6. 最初と最後の頁 e2020JE006606
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2020JE006606	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Kuwahara Ayumu, Kurokawa Hiroyuki	4. 巻 643
2. 論文標題 Influences of protoplanet-induced three-dimensional gas flow on pebble accretion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A21 ~ A21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/0004-6361/202039153	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 Kuwahara Ayumu, Kurokawa Hiroyuki	4. 巻 633
2. 論文標題 Influences of protoplanet-induced three-dimensional gas flow on pebble accretion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A81 ~ A81
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/0004-6361/201936842	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 黒川宏之	4. 巻 28(4)
2. 論文標題 惑星系の形成と進化	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 遊星人	6. 最初と最後の頁 266-276
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kuwahara Ayumu, Kurokawa Hiroyuki, Ida Shigeru	4. 巻 623
2. 論文標題 Gas flow around a planet embedded in a protoplanetary disc	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A179 ~ A179
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201833997	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 黒川 宏之、櫻庭 遥	4. 巻 27
2. 論文標題 火星大気と表層水の起源と進化：理論モデルと同位体組成からの制約	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本惑星科学会誌遊星人	6. 最初と最後の頁 127 ~ 137
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14909/yuseijin.27.3_127	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 Kurokawa Hiroyuki, Foriel Julien, Laneuville Matthieu, Houser Christine, Usui Tomohiro	4. 巻 497
2. 論文標題 Subduction and atmospheric escape of Earth's seawater constrained by hydrogen isotopes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 149 ~ 160
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2018.06.016	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 該当する

1. 著者名 Kurokawa Hiroyuki, Tanigawa Takayuki	4. 巻 479
2. 論文標題 Suppression of atmospheric recycling of planets embedded in a protoplanetary disc by buoyancy barrier	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 635 ~ 648
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty1498	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22件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 黒川 宏之
2. 発表標題 小天体と惑星の水・岩石反応と物質輸送
3. 学会等名 惑星圏研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 黒川 宏之
2. 発表標題 C型小惑星の起源と炭素質コンドライト隕石との繋がり:水岩石反応と赤外スペクトルモデルからの示唆
3. 学会等名 日本惑星科学会2020年秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 桑原 歩
2. 発表標題 原始惑星系円盤内に埋没した原始惑星周りの 3 次元ガス流構造:その形態とペブル降着への影響
3. 学会等名 日本惑星科学会2020年秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kurokawa, H., Sakuraba, H., Shibuya, T., Sekine, Y., Ehlmann, B. L., Usui, F.
2. 発表標題 Origin of nitrogen in Earth's mantle constrained by models for partitioning and cycling
3. 学会等名 Europlanet Science Congress 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kurokawa, H., Sakuraba, H., Shibuya, T., Sekine, Y., Ehlmann, B. L., Usui, F.
2. 発表標題 Spectral evidence for the distant origin and water-rock differentiation of large C-type asteroids
3. 学会等名 JPGU-AGU Joint Meeting 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kawahara, A.
2. 発表標題 Influence of protoplanet-induced gas flow on pebble accretion: Implications for the dichotomy between inner super-Earths and outer gas giants
3. 学会等名 JPGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kurokawa, H., Sakuraba, H., Shibuya, T., Sekine, Y., Ehlmann, B. L., Usui, F.
2. 発表標題 Evolution of planetary water: The perspective on planet formation and material transport in the Solar System
3. 学会等名 The 21st Symposium on Planetary Sciences (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kurokawa, H., Shibuya, T., Sekine, Y., Ehlmann, B. L., Usui, F.
2. 発表標題 Paleo-aqueous environments of volatile-rich asteroid
3. 学会等名 Challenging the Perceptions of the Requirements for Life on Earth and Other Worlds, (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 黒川 宏之
2. 発表標題 揮発性元素に富んだ小惑星の赤外スペクトルモデルと観測の比較
3. 学会等名 第3回水惑星学全体会議
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kurokawa, H., Shibuya, T., Sekine, Y., and Ehlmann, B. L.
2. 発表標題 Modeling of infrared reflectance spectra of volatile-rich asteroids
3. 学会等名 Asteroid Science in the Age of Hayabusa2 and OSIRIS-REx (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒川 宏之
2. 発表標題 惑星系の形成と進化
3. 学会等名 日本惑星科学会 2019年秋季講演会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kurokawa, H., Kuwahara, A., and Okuzumi, S.
2. 発表標題 Hydrodynamic effects on the accretion of gas and dust onto protoplanetary cores
3. 学会等名 EPSC-DPS Joint Meeting 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒川 宏之, 桑原 歩, 奥住 聡
2. 発表標題 Icy pebble accretion onto terrestrial planets: the effect of gas flow
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒川 宏之, 渋谷 岳造, 関根 康人, Ehlmann, B. L.
2. 発表標題 A forward modeling of infrared reflectance spectra of asteroids
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kurokawa, H.
2. 発表標題 The climate and redox state of early Mars: insights from isotopes
3. 学会等名 EGU General Assembly 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒川宏之、桑原歩、奥住聡
2. 発表標題 Icy pebble accretion onto terrestrial planets: the effect of gas flow
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kurokawa Hiroyuki
2. 発表標題 Can icy pebble accretion form habitable planets?
3. 学会等名 The 1st International Workshop for Aquaplanetology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒川宏之
2. 発表標題 氷ペブルによる地球型惑星への水供給
3. 学会等名 第2回水惑星全体会議
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kuwahara Ayumu, Kurokawa Hiroyuki, Ida Shigeru
2. 発表標題 Gas flow around a planet embedded in a protoplanetary disc: the dependence on the planetary mass
3. 学会等名 American Astronomical Society, DPS meeting #50
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 黒川 宏之、谷川 享行、桑原 歩、井田 茂
2. 発表標題 惑星近傍の原始惑星系円盤ガス流れ場とスーパーアース形成過程への示唆
3. 学会等名 日本惑星科学会 2018年秋季講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 黒川 宏之、谷川 享行
2. 発表標題 原始惑星系円盤に埋もれた惑星大気のリサイクリング：浮力バリアによる抑制
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 桑原 歩、黒川 宏之、井田 茂
2. 発表標題 Gas flow around low mass planets in a protoplanetary disk: the dependence of out-flow speed on the planetary mass
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2018年大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Planetary seed-induced storms have determined... http://www.elsi.jp/en/news_events/highlights/2020/20200128_hkurokawa 原始惑星が巻き起こす嵐が、惑星系の姿を決定づけた http://www.elsi.jp/ja-JP/news_events/highlights/2020/20200128_hkurokawa
--

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

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
---------	---------