

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26800242

研究課題名(和文) マグマオーシャンと大気の共進化過程で生じる惑星多様性の理解

研究課題名(英文) Understanding of planetary diversity originated from coupled evolution of early atmosphere and magma ocean

研究代表者

濱野 景子(飯塚景子)(Hamano, Keiko)

東京工業大学・地球生命研究所・JSPS特別研究員

研究者番号：40646171

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：大気の温室・保温効果，大気散逸，マグマオーシャンからの脱ガス，地表での大気-マグマ間の酸化還元反応，これらすべての過程を組み合わせたモデルを開発し，水素-水蒸気大気とマグマオーシャンの進化計算を行った．地球軌道では総水素量が，水に換算して数倍の海洋質量相当以下であれば，惑星の固化時間への影響は少ない．一方で，固化後に残る大気組成は初期大気・マグマオーシャンの酸化還元度に強く依存し，初期大気が還元的であれば，他の温室効果気体がなくとも水素の効果で温暖な気候となりうる．より水素量が多い場合や金星軌道では，惑星の固化時間は水素の散逸速度に律速され，初期水素量に応じて長くなる．

研究成果の概要(英文)：We have developed a coupled model of H₂-H₂O atmospheres and magma oceans to investigate how initial redox state of atmospheres and magma oceans affects solidification time and the subsequent early climate. Our model includes blanketing effects by an H₂-H₂O atmosphere, escape of H₂ into space, outgassing of H₂ and H₂O, and redox reaction between an atmosphere and a magma ocean. At the Earth's orbit, amount of H₂ has less affected the solidification time of a magma ocean, as long as the total H₂ water-equivalent mass is less than several ocean mass of water. However, the initial composition of the atmosphere greatly affects the atmospheric composition after solidification. If several bars of H₂ remains after the solidification, it can keep the surface temperature above the freezing point of water without other greenhouse gases. In the case with the larger H₂ amount or at closer orbit to the young Sun, the solidification time becomes sensitive to the initial amount of H₂ and H₂O.

研究分野：惑星システム進化学

キーワード：マグマオーシャン 脱ガス大気 酸化還元度

1. 研究開始当初の背景

水星・金星・地球・火星は主に岩石から成り「地球型惑星」と一括りに分類されるが、現在の大気組成や海・プレートテクトニクスの有無など様相は大きく異なる。この多様性の起源の理解は惑星科学の主目的の一つであり、軌道や質量など主に形成段階で決まるものとその後進の過程で生じるものがある。本研究では、進化の最も初期の段階、惑星の固化過程で生じる多様性について明らかにする。

これまで惑星の固化と分化、脱ガス大気形成、大気散逸などの個々の過程については多くの先行研究が存在する。一方で、シリケートメルトへの溶解度が高い分子種にとって、マグマオーシャンは重要なリザーバである。固化の過程での脱ガスにより、大気量や組成は時々刻々と変化すると考えられる。大気形成は温室効果・保温効果を介して、マグマオーシャンの熱進化へ影響を与えられられる。

相互作用を含めたマグマオーシャンと大気の共進化は、近年研究されつつある分野である (Elkins-Tanton, 2008; Lebrun et al. 2013; Hamano et al. 2013)。これまでに代表者は水の挙動に着目し、惑星の固化と水蒸気大気形成と進化について検討を行った。そして、形成直後の質量や組成が全く同じであっても、ある軌道を境に水を残したまま速やかに冷却・固化する惑星と、水をほぼ失うまで固化せず非常に長く熔融状態が続く惑星とに分類できることを示した。これは軌道によって固化を律するプロセスが異なることに由来し、その分岐条件はアルベドや初期の太陽光度などで決定される。

これまでの大気とマグマオーシャンの共進化過程の研究では、代表者も含め、水蒸気・二酸化炭素のみの酸化的大気組成で検討が行われている。しかし、原始惑星上では様々な酸化還元度をもつ大気が形成されうる。例えば、金属鉄が存在するとき、地球マントル中の FeO 量から予想される初期酸素 fugacity は Fe-FeO (IW) バッファで決まる値から二桁小さい ($\Delta IW-2$)。この場合、 H_2/H_2O 比は 10 程度であり、水蒸気が存在する場合大量の水素を含みうる。水素は赤外不活性であるが衝突誘起吸収を起こすため、大量の水素を含む場合は温室効果ガスとして重要である。そのような状況化でのマグマオーシャンと大気の共進化はまだ検討されていない。また、初期気候・有機物生成率・生命の発生の観点からも、固化した時点での初期大気酸化還元度そのものが非常に重要である。

2. 研究の目的

大気とマグマオーシャンの間には温室効果を介した相互作用が存在し、両者の進化は同時に議論されるべき課題である。本研究ではこの共進化過程を、これまでの水蒸気大気検討に加え、大気酸化還元度 (H_2/H_2O 比) にも着目し検討する。大規模に熔融した惑星の固

化時間と、固化した時点で実現される惑星の水量、大気酸化還元度を律する過程を明らかにする。また、固化後に残存する大気組成から初期気候への影響を議論する。

また、惑星の固化時間と衝突間隔の関係は、巨大衝突段階での水の挙動にとって重要となり得る。なぜなら水の大部分がマグマオーシャンに溶けている場合、惑星自体が破壊されない限り衝突時に惑星が水を失えないからである。マグマへの溶解度によって、衝突時の大気はざとりが与える影響を議論する。

3. 研究の方法

本研究では、 H_2-H_2O 大気量・組成の変化に伴う温室効果を適切に評価するための大気モデルが必要である。これまで代表者は灰色大気モデルを用いていた。しかし近年、高温大気へ適用可能な吸収線データベース HITEMP2010 を利用した非灰色大気放射モデルが複数開発され (Goldblatt et al., 2013; Koppurapu et al., 2013)、その結果、高温な大気では、通常の数百 K 程度では無視される近赤外・可視光領域での吸収が、惑星放射・アルベドに強く影響することが示された。よって、これらの影響を考慮するため、本研究ではまず非灰色 H_2-H_2O 大気放射モデルの開発を行った。

水蒸気吸収データベースについては先行研究と同様に HITEMP2010 を、新たに加える水素の衝突誘起吸収には HITRAN2012 を用い、散乱にはレイリー散乱を考慮した。波長方向には相関 k 分布法を用いた。各層での正味フラックスを用いた放射対流平衡の大気構造の収束には、高速化のため Newton-Raphson 法を用いたモジュールの開発を行った。

非灰色大気モデルを開発後、共進化モデルへ組み込み、マグマオーシャンと大気進化計算を行った。大気・マグマ間の酸化還元反応には Kress and Carmichael (1991) の表式を用い、地表での化学平衡・気体種の溶解平衡と質量保存 (H, O) とから、大気量・組成変化を計算した。大気散逸は初期太陽からの EUV フラックスに Ribas et al. (2005) を用いて、加熱効率 0.1 で計算を行った。

4. 研究成果

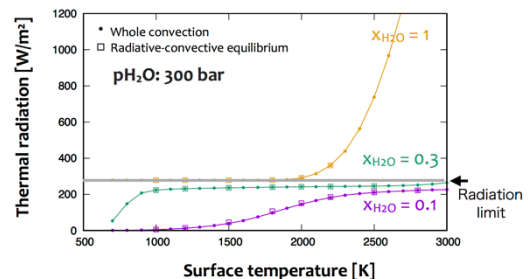


図1. 惑星から射出される熱放射。オレンジ、緑、紫はそれぞれ地表水蒸気モル分率 x_{H_2O} が 1, 0.3, 0.1 の場合に対応。地表水蒸気分圧は 300 bar に固定。地表温度が高くなるにつれ、惑星放射は増加する傾向にあるが、水蒸気大気 ($x_{H_2O}=1$) では約 280 W/m^2 (射出限界、灰色) を下回ることはない。水素量が増加するにつれ、惑星放射は射出限界の値を下回るようになる。

(1) 非灰色一次元放射対流平衡計算を行い、様々な大気量・地表の水素モル分率に対して水素-水蒸気大気の構造計算を求め、惑星放射フラックスを計算した(図1)．地表温度の上昇とともに大気温度も上昇し、またより短い波長の熱放射も増加する．その結果、高温な地表温度では、惑星放射は増加する．大気量の増加とともに、一般には惑星放射は減少する傾向にあるが、水蒸気大気に顕著な特徴として惑星放射には下限値(射出限界)が存在する．これは、対流圏上部で凝結が生じることに由来し、その値は先行研究(Kopparapu et al. 2013; Goldblatt et al. 2013)とよく一致する．

一方、水素を加えた場合、惑星放射はこの射出限界を下回りうることで新たにわかった．図1では、地表の水蒸気分圧を一定とし比較している．この場合、水素モル分率の増加に伴い、水蒸気の気柱質量が増加する．これと水素の保温効果により、水素モル分率が低いほど惑星放射の減少が顕著となる．大気中の全水素量を300 barの水相当量とした場合でも、水蒸気大気に比べ、水素を加えることで惑星放射が低下する．

惑星放射が数百 W/m²程度の場合では、大気構造を全対流とした場合と放射対流平衡構造とした場合とで、惑星放射の違いは数%以下であることがわかった．この結果に基づき、計算時間の短縮のために全対流の大気温度構造を用いて、進化計算を行うこととした．

(2) 初期太陽光度を現在の太陽 70%とすると、初期地球が受け取る正味太陽放射はおおよそ 170 W/m²である．この場合、地球が固化するための大気中水素量の上限值は、水に換算して海洋質量の数倍に相当する．地質学的証拠より明らかになっている、地球の大酸化イベント(約 2.5Ga)までに大気散逸で惑星外へ逃がせる水素量を上限とすると、地球軌道では惑星の固化時に惑星放射は常に正味太陽放射を上回る．初期の酸素フガシティーが ΔIW-2 であっても、総水素量が、水に換算して5海洋質量程度であれば、固化の条件を満たす．

一方で、地球サイズの惑星が円盤ガス中で形成し、水素に富んだ捕獲大気を形成した場合には、大気中のダスト量によっては固化するための上限を超えうる(Ikoma and Genda,

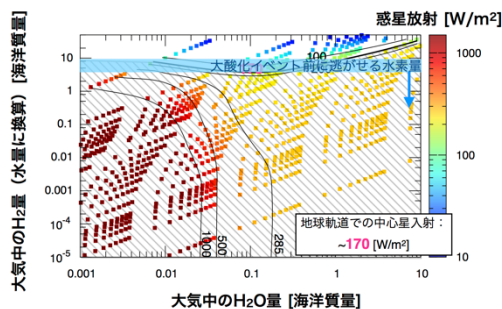


図2. 地球軌道での地表の固化条件. 地表温度1,500 K(シリダス近傍)での、大気中の水素・水素量と惑星放射の関係. アルベドを0.3とすると、初期地球が受け取る正味太陽放射は約170 W/m². 地表温度が低下するためには、大気中の水蒸気・水素量が網掛けの範囲に入る必要がある.

2006). この場合、地表が固化するためには、大気から水素を散逸または除去する何らかの過程が必要となることが予想される．

(3) 惑星放射の値をテーブル化し、マグマオーシャンと大気の進化計算を行った．総水素量が5海洋質量相当の場合、水蒸気大気と比べて、地球軌道での固化時間は 2-3 倍還元的な場合(初期の酸素フガシティーが ΔIW-2)で長くなる．図2の条件を満たす限り、地球軌道では惑星は一千万年以内には固化する．

一方、金星軌道では固化時間は大気の酸化還元度にほとんど依存しないことがわかった．これは水素または水蒸気の散逸率が固化を律速していることによる．モデルでは散逸率計算のための加熱効率を一定としているが、これが上層大気組成(水素か水蒸気)に強く依存する場合には、固化時間にも違いが見られると予想される．

惑星上では、大気と地表のマグマとの間で酸化還元反応が生じる．本研究では温度低下と脱ガスによる影響を考慮した．還元的な初期条件で計算を始めた場合、一部の水素がマグマ中の三価の鉄を還元し、二価の鉄と水を生じる．地球軌道におけるこの反応による水素の損失量(水の生成量)は、今回検討したパラメータ範囲では 0.1 海洋質量程度であった．よって、初期に大量の水素が存在した場合、それは固化後の大気に残る．

惑星形成のシミュレーションによると、巨大衝突の間隔は、原始惑星の個数に応じて、初期は 10⁵年と短く、時間とともに 10⁷年へと長くなる傾向にある．水に比べ、水素のメルトへの溶解度は一般に小さく、より多くの割合の水素が大気中へと分配される．その結果、次の巨大衝突時に溶融している場合には、水素が選択的に散逸する．一度の衝突で全水量に対する全水素量の比は、0.8-0.9割に減少する．つまり巨大衝突が繰り返されることで、惑星は酸化される可能性があることが新たにわかった．

(4) 残存した水素の初期気候への影響を検討するために、液体の水が地表に存在できる条件の検討を行った(図4)．数 bar 程度の

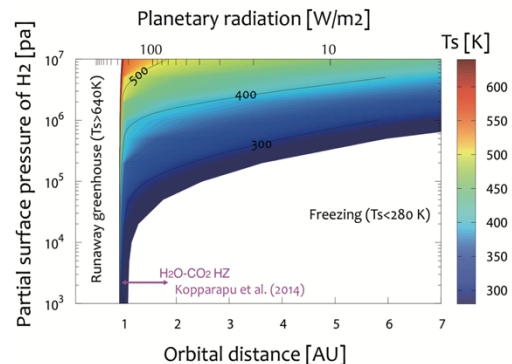


図3. H₂-H₂O大気のハビタブル・ゾーン. 地表温度が(i)凝固点を超え、かつ(ii)臨界点温度を下回る水素分圧をプロット. 地表の水蒸気分圧は地表温度での水の蒸気圧で与えている. 先行研究(Pierrehumbert and Gaidos, 2010)で指摘されたように、H₂O-CO₂でのハビタブルゾーン(H₂Oが液体の水として存在しうる軌道領域)より遠方まで広がる.

水素があれば H_2O-CO_2 で求められたハビタブルゾーンの外側でも温暖な条件が保たれる。これは、結果(1)と同様の理由で、水素による大気中の平均分子量が減少する効果で、大気スケールハイトが増加し、その結果、純粋な水蒸気大気と比べて水蒸気の気柱質量が増加することによる。一方で、これは、地表の水蒸気分圧を海洋形成に十分な値に保つには、水素を加えることでより多くの水が必要であることを意味する。

<引用文献>

・Elkins-Tanton, L. 2008, E&PSL, 271, 181
 ・Lebrun, T., Massol, H., Chassefière, E., et al. 2013, JGRE, 118, 1155
 ・Hamano, K., Abe, Y., & Genda, H. 2013, Natur, 497, 607
 ・Kopparapu, R. K., Ramirez, R., Kasting, J. F., et al. 2013, ApJ, 765, 16
 ・Kopparapu, R. K., Ramirez, R. M., Kotte, J. S., et al. 2014, ApJL, 787, L29
 ・Goldblatt, C., Robinson, T. D., Zahnle, K. J., & Crisp, D. 2013, NatGe, 6, 661
 ・Ikoma, M., & Genda, H. 2006, ApJ, 648, 696
 ・Pierrehumbert, R. & Gaidos, E., 2011, ApJL, 734:L13

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, すべて査読あり)

① M. Ikoma, L. Elkins-Tanton, K. Hamano, J. Suckale, “Water Partitioning in Planetary Embryos and Protoplanets with Magma Oceans”, *Space Science Reviews*, 214:76, (2018), <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0508-3>
 ② H. Massol, K. Hamano, F. Tian, M. Ikoma, Y. Abe, E. Chassefière, A. Davaille, H. Genda, M. Güdel, Y. Hori, F. Leblanc, E. Marcq, P. Sarda, V. I. Schematovich, A. Stökl, H. Lammer, “Formation and Evolution of Protoatmospheres”, *Space Science Reviews*, 205, 153-211 (2016), DOI 10.1007/s11214-016-0280-1
 ③ K. Hamano, H. Kawahara, Y. Abe, M. Onishi, G. L. Hashimoto, “Lifetime and spectral evolution of a magma ocean with a steam atmosphere: Its detectability by future direct imaging”, *The Astrophysical Journal*, 806, 216-232 (2015), doi:10.1088/0004-637X/806/2/216

[学会発表] (計 16 件)

① (invited) K. Hamano, “Temporal variations of thermal emission from solidifying terrestrial planets”, DTA SYMPOSIUM VIII, “Challenge to super-earths and their atmospheres”, 2018
 ② (invited) K. Hamano, “Role of water in the evolution of molten terrestrial planets”, Interdisciplinary workshop “Water during planet formation and evolution”, 2018
 ③ 濱野景子 他, “還元的な大気下での惑星初期進化の軌道依存性”, 惑星科学会秋季講演会, 2017
 ④ 濱野景子 他, “水素に富む大気をもつ地球型惑星の固化と初期表層環境”, 連合大会, 2017
 ⑤ 濱野景子 他, “水素-水蒸気大気下での海洋形成条件”, 連合大会, 2017
 ⑥ K. Hamano, “Detectability of molten terrestrial planets with steam atmospheres”, Japan-Germany planet & disk workshop, 2016
 ⑦ K. Hamano, “Formation of early planetary atmosphere: its effects on evolution and observation of magma-covered planets”, Magma oceanology workshop, 2016
 ⑧ (招待講演) 濱野景子, “ジャイアントインパクト後の地球型惑星の初期進化”, 宇宙生命計算科学連携拠点第二回ワークショップ, 2016
 ⑨ 濱野景子 他, “地球型惑星の熔融時間と放射スペクトルの時間進化”, 天文学会春季年会, 2016
 ⑩ K. Hamano, et al., “Thermal history and atmospheric evolution of terrestrial planets after giant impacts”, Exoplanet and Disks: The formation and diversity III, 2016
 ⑪ K. Hamano, et al., “Lifetime and Spectral Evolution of a Magma Ocean with a Steam Atmosphere”, Extreme solar systems III, 2015
 ⑫ 濱野景子 他, “水素-水蒸気大気を持つ地球型惑星の海洋形成条件”, 惑星科学会秋季講演会, 2015
 ⑬ 濱野景子 他, “水蒸気大気におおわれたマグマオーシャンの寿命と放射スペクトル進化”, 連合大会, 2015
 ⑭ (invited) K. Hamano, et al., “Evolution of Early Atmosphere on Terrestrial Planets after Giant impact”, Goldschmidt Conference, 2014
 ⑮ (invited) K. Hamano and Y. Abe, “Magma ocean/protoatmosphere coupling and role of giant impacts in protoatmosphere loss”, ISSI-BJ/ISSI workshop, “The disk in relation to

the formation of planets and their protoatmospheres”, 2014

- ⑩ 濱野景子 他, ” マグマオーシャンに覆われた惑星の光度進化曲線とその検出可能性”, 惑星科学会秋季講演会, 2014

[その他]

- ① 系外惑星の辞典(朝倉書店, 2016)の二項目, 「暴走温室状態」と「凍結限界」の項目の執筆
- ② 濱野景子 「マグマオーシャン上の惑星大気の組成, 熱放射スペクトルと進化」遊星人, vol. 26, p59-67, 2017
- ③ スーパーサイエンスハイスクール指定校, 武庫川女子中学校学生へのアウトリーチトーク, 「'生まれたての地球'を見る」, 2016
- ④ アウトリーチイベント, ELSI Originsでの講演, 「地球大気の起源」, 2017

6. 研究組織

(1) 研究代表者

濱野 景子 (HAMANO, Keiko)

東京工業大学・地球生命研究所・JSPS 特別研究員

研究者番号: 40646171

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし

(4) 研究協力者

阿部 豊 (ABE, Yutaka)

東京大学・地球惑星科学専攻システム講座・准教授

玄田 英典 (GENDA, Hidenori)

東京工業大学・地球生命研究所・准教授