

系外巨大ガス惑星回りのハビタブルムーンの形成とその安定性

佐藤 貴央 (東京工業大学大学院 理工学研究科)

Abstract

太陽系外惑星が発見されるにつれて、それらの中に生命居住可能 (ハビタブル) な惑星は存在するのか否かという問題は重要なテーマとなってきた。そのなかでも、本研究では、系外巨大ガス惑星周りに存在していると考えられる系外衛星の生命居住可能性について考察した。系外衛星がハビタブルであるために必要な条件が先行研究 (Williams et al. 1997) によって見積もられており、地球質量の 0.12 倍の質量を保持した岩石衛星であることが示唆されている。そこで、本研究ではガス惑星がハビタブルゾーン内に存在した時、この質量を保持した衛星 (ハビタブルムーン) の形成可能性や軌道安定性を複数の先行研究をもとに検証した。その結果、形成についてはその起源である周惑星円盤の温度構造から、衛星が形成される場合、岩石衛星になりやすいことが示唆できた。また、軌道安定性についてもガス惑星のタイプ II 軌道移動の影響や、恒星からの潮汐力による影響を受けることなく、ハビタブルゾーン内で安定して存在していられることが示唆できた。よって本研究から、ハビタブルムーンの形成や軌道安定性が示された。

1 Introduction

1995 年に初めて太陽系外惑星が発見されて以来 (Mayor & Queloz 1995)、多くの系外惑星が発見され続け、2013 年 5 月 27 日現在までに 889 個の惑星が確認されている¹。その発見されている系外惑星のほとんどは木星や土星のような巨大ガス惑星であり、G 型星のハビタブルゾーンである 1AU 付近にも多数観測されている (図 1)。

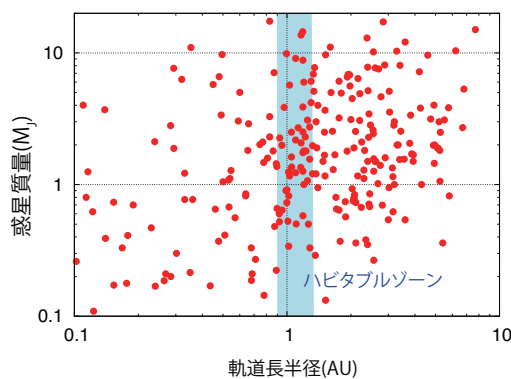


図 1: G 型星周りで発見されている系外惑星の質量と軌道長半径の視線速度法による観測結果。The Extrasolar Planets Encyclopaedia より引用の図を一部改変。

¹ “ The Extrasolar Planets Encyclopaedia ”
<http://exoplanet.eu/catalog.php>

これらの発見とともに関心が高まっているのが衛星の存在であり、実際にはまだ観測されていないが、系外衛星に関する研究がいくつかされている (e.g., Barnes & O'Brien 2002)。そのほとんどは中心恒星に近い軌道をしている木星型惑星 (ホットジュピター) 周りの衛星の存在を示唆するものである。そこで本論文では、ハビタブルゾーン内に木星型惑星が存在しているとし、その周りにハビタブルムーンが存在しうるかどうかについて考えた。ハビタブルムーンとは、生命居住可能な衛星のことである。本論文では、G 型星周辺のハビタブルゾーンを考え、およそ 1AU を基準にし、議論を行った。

ハビタブルムーンの研究論文として代表的なものに Williams et al. (1997) がある。本論文は、Williams et al. (1997) でのハビタブルムーンの定義を参考にし、その条件を満たした衛星の形成可能性や軌道安定性について考えていく。

2 Previous Work and Goal

ハビタブルムーンの定義に関わる先行研究として、Williams et al. (1997) を紹介する。Williams et al. (1997) では通常の意味での生命居住可能性の定義、つまり惑星表面に液体の水が存在するという条件にさらに制約を与え、地球上の生物が長期間に渡って生命活動できることを条件に課し、そのために必要な巨大ガス惑星まわりの

衛星の質量下限値を見積もっている。またその質量見積もりにおいて木星の衛星であるイオの密度 ($=3.5\text{g/cm}^3$) やガス惑星からの距離 ($=1.40 \times 10^{-3}\text{AU}$) などを基準として用いている。

Williams らが最初に注目したのが大気保持、特に地球大気の大部分を占める窒素と酸素の保持についてである。現在の地球大気と同量の大气を保持した衛星を仮定し、その衛星が 45 億年間窒素と酸素を保持できる質量を考えていく。

ここで重要視されるのが窒素の散逸である。酸素に関しては、植物の光合成によって置き換えられたり、水という形で大量に存在することを考慮するとあまりその散逸は重要でないと考えられる。一方、窒素の散逸は不可逆的であり、有機物の代謝に必要とされることに加え、酸素の自然燃焼を防ぐ無毒の緩衝剤として不可欠である為、その散逸を抑えることが重要となってくる (Watson et al. 1978; McKay et al. 1991)。この散逸プロセスの一つが N_2^+ の解離性再結合によるイオン化である (McElroy 1972)。この散逸プロセスは火星において重要なプロセスとされており、このプロセスを無視できるような質量は、イオの密度や非熱的な N 原子の脱出速度を考慮して考えるとおよそ $0.12M_E$ と見積もる事ができ、これが非熱的散逸を防ぐ為に必要な質量の下限値と考える事ができる。

以上の議論から大気保持に必要な質量の下限値を $0.12M_E$ と考えることとし、以下で生命居住可能性に関わる他の要因について議論していく。

衛星の生命居住可能性を脅かす要素として、ガス惑星の磁場や、離心率・潮汐ロックなどによる気候変動が考えられる。しかし惑星の磁場の影響は、衛星が磁場を持つことにより抑制できると考えられており、水星 ($0.06M_E$) やガニメデ ($0.03M_E$) が磁場を保有していることを考えると $0.12M_E$ の質量を持つ衛星ならば磁場を保有し、効果的に惑星磁場の影響を抑制できると考えられる。また、大気を持つことによって気候変動を緩和できるとも考えられ、大気保持は生命居住可能性において重要な要素になっている。

一方、長期的な生命居住可能性を実現するためのプロセスとして、炭素循環が考えられている。炭素循環ではシリケートの風化が起これ、そのために乾いた陸地の存在が重要視されている。そこで Williams et al. (1997) では、イオのような岩石主体の衛星の必要性が示唆され

ている。

さらに、炭素循環に必要なもう一つの要素がプレートテクトニクスである。このプレートテクトニクスを維持する為の必要条件のひとつに、惑星や衛星内部からの十分量の熱フラックスの存在がある。これはイオのような潮汐力の影響を加味すれば、十分プレートテクトニクスを引き起こす内部フラックスが得られると考えられており、よって $0.12M_E$ の質量をもつ岩石衛星ならば、長期間生命居住可能な環境が維持される可能性がある事が示唆されている。

Williams et al. (1997) によって、上記のようなハビタブルムーンの質量見積もりやその妥当性が示された。しかし、Williams et al. (1997) ではこの質量を持った岩石衛星が巨大ガス惑星まわりに形成されるのかどうか、また、形成された衛星がハビタブルゾーンで安定して存在していただけるかどうかという問題について議論されておらず、この問題を考えることは、ハビタブルムーン存在を議論するうえで非常に重要である。そこで本研究では、(1) 岩石衛星の形成 (2) ハビタブルゾーンでの軌道安定性について議論することを目的とし、ハビタブルムーン存在可能性を考える。

3 Formation of Habitable Moon

本研究の目的 (1) 岩石衛星の形成について考察する。巨大ガス惑星周りの衛星は、惑星集積の最終段階に形成された周惑星円盤内で作られたと考えられている (Canup & Ward 2006; Sasaki et al. 2010)。ここでは、簡単の為に衛星形成のタイムスケールを原始惑星系円盤の散逸のタイムスケールに合わせ、 10^6 年程度のタイムスケールで計算を行った。また、主惑星の質量 (M_p) と形成された衛星系の質量 (M_s) の比がおおよそ $M_s/M_p \sim 10^{-4}$ 程度である事が示唆されている (Canup & Ward 2006)。そこで本研究では、上記の関係式から質量が $0.12M_E$ である衛星を形成する為に、ガス惑星質量を $M_p \approx 5M_J$ とした。なお、 M_J は木星質量である。

岩石衛星の形成を考察する為に、周惑星円盤の温度構造を見積もる。周惑星円盤には「質量降着円盤」モデルを用いる。原始衛星の成長率は、周惑星円盤の固体物質の表面密度に依存している (Ida & Lin 2004)。 $r < r_c$ での周惑星円盤の面密度分布は、次式で与えられる (Canup & Ward 2006)。

$$\Sigma_g = \frac{F_p}{3\pi\nu} \left[1 - \frac{4}{5} \sqrt{\frac{r_c}{r_d}} - \frac{1}{5} \left(\frac{r}{r_c} \right)^2 \right] \simeq 0.55 \frac{F_p}{3\pi\nu} \quad (1)$$

F_p : $r < r_c$ での全円盤領域でのガス流入率、 ν : ガス円盤粘性、 r_d : diffused-out disk outer edge $\approx 150R_p$ 、 r_c : 原始惑星系円盤からのガス流入率が一定になる半径 $= 30R_p$ である (Machida 2009; Machida et al. 2008)。 R_p は惑星半径。原始惑星系円盤から周惑星円盤へのガス流入量を一定とすると、定常降着状態では、円盤散逸の典型的なタイムスケール τ_G を用いて、 $F_p = M_p/\tau_G$ と表せる。Canup & Ward (2006) では、土星では $\tau_G = 5 \times 10^6$ yr、木星では $\tau_G = 2 \times 10^6$ yr を用いている。また、ガス流入率を $\tau_{\text{dep}} = 3 \times 10^6$ yr - 5×10^6 yr のタイムスケールで指数関数的に減少させる。本研究では、 τ_G 、 τ_{dep} の値として、 $\tau_G = 5 \times 10^6$ yr, $\tau_{\text{dep}} = 4 \times 10^6$ yr を採用した。

ここで、本研究における周惑星円盤の受け取る熱源を、円盤の粘性加熱のみであると仮定する。この時、円盤の表面温度 (T_d) は、黒体放射と粘性加熱の釣り合いで決定され、以下のように表せる。

$$\sigma_{\text{SB}} T_d^4 \simeq \frac{9}{8} \Omega_K^2 \nu \Sigma_g \simeq \frac{0.55 \times 3}{8\pi} \Omega_K^2 F_p \quad (2)$$

σ_{SB} : ステファン・ボルツマン定数、 Ω_K : ケプラー角速度。上式を解けば、ガス流入率 (F_p) = 一定での円盤表面温度 $T_{d,0}$ が以下のように表せる。

$$T_{d,0} \simeq 160 \left(\frac{M_p}{M_J} \right)^{1/2} \left(\frac{\tau_G}{5 \times 10^6 \text{yr}} \right)^{-1/4} \left(\frac{r}{20R_J} \right)^{-3/4} \text{K} \quad (3)$$

R_J : 木星半径。実際は、ガス流入率は指数関数的に減少させるので、その効果を考えれば円盤表面温度 (T_d) は、

$$T_d = T_{d,0} \exp\left(-\frac{t}{4\tau_{\text{dep}}}\right) \quad (4)$$

となる。本研究では、(4) 式を用いて円盤散逸のタイムスケールに合わせ、円盤表面温度と円盤半径の関係性を考察した。また、円盤表面温度がアイスライン ($T = 170\text{K}$) を上回ったときに氷が生成されず、岩石衛星が形成されるとした。

その結果が図 2 である。図 2 をみると、すべての年代で、また、すべての領域で円盤表面温度がアイスライン

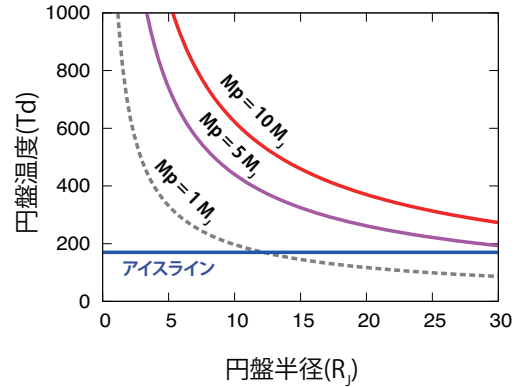


図 2: $M_p = 5M_J$ での周惑星円盤表面温度。時間の経過による表面温度の変化とアイスライン ($T = 170\text{K}$) との比較を表している。横軸は円盤半径。

を越えていることが確認できる。この結果から、 $M_p = 5M_J$ のガス惑星周りで衛星が形成されたとすれば、それらはその主惑星との距離に関わらず岩石衛星となる可能性が高いことを示唆することができた。

4 Influence of Type II Migration

次に、ガス惑星がタイプ II 軌道移動することによる影響を考えていく。この影響を考えるにあたって Namouni et al. (2010) を参考にした。衛星の公転周期は太陽系で考えれば、 $1 - 10^2$ 日程度であり、タイプ II 軌道移動のタイムスケール ($\sim 10^5 \text{yr}$) より圧倒的に短い。よって、衛星軌道には直接的な影響はなく、衛星の軌道長半径は一定に保たれるとする。しかし、ガス惑星の軌道長半径はガス惑星自身の軌道移動により徐々に小さくなっていく。これに伴い変化するのが、惑星のヒル半径である。ヒル半径は次式で表される。

$$R_H = a_p \left(\frac{M_p}{3M_*} \right)^{1/3} \quad (5)$$

a_p は惑星の軌道長半径、 M_* は太陽質量である。このヒル半径が小さくなっていくことにより、衛星が安定して存在できる衛星の軌道長半径の外側限界 (R_{SZ}) も小さくなっていき、次式で表される (Domingos et al. 2006)。

$$R_{\text{SZ}} = fR_H \quad (6)$$

f は順行衛星と逆行衛星で異なる定数であり、今回は $f=0.48$ とした。(6) 式から、衛星形成時は惑星の重力圏に存在していても、惑星が軌道移動することによって重力圏から衛星が脱出してしまう可能性がある。この効果により衛星軌道が不安定になることが考えられる。そこで、(5), (6) 式から衛星軌道が不安定になり始める惑星の軌道長半径の臨界値を求める。(6) 式における R_{SZ} を a_s で置き換え、 $a_s = fR_H$ となるときの惑星の軌道長半径 ($a_{p,crit}$) について解くと、

$$a_{p,crit} = \frac{a_s}{f} \left(\frac{3M_*}{M_p} \right)^{1/3} \quad (7)$$

となる。このとき衛星の軌道長半径を $30R_J$ 、ガス惑星質量を $5M_J$ とすると、 $a_{p,crit} \approx 0.25AU$ となる。よって、タイプ II 軌道移動によって $1AU$ 付近まで移動してきても衛星軌道は安定であることが示された。

5 Long Orbital Stability

前節では、短期的な軌道安定性を議論したが、今節では $1AU$ 付近での長期的な軌道安定性を議論する。ここでは Barnes & O'Brien (2002) を参考にした。そのために、中心星による潮汐力の影響を考えていく。衛星の寿命を T とすると、衛星が惑星から最も遠ざかる臨界値 ($a_s = a_{crit}$) と衛星の初期の軌道長半径 ($a_{s,i}$) 表すことができ、その値は Murray & Dermott (2000) より、

$$T = \frac{2}{13} \left(R_{SZ}^{13/2} - a_{s,i}^{13/2} \right) \frac{Q_p}{3k_{2p}M_sR_p^5} \sqrt{\frac{M_p}{G}} \quad (8)$$

と表せる。 k_{2p} : 惑星の Love number、 G : 万有引力定数、 R_p : 惑星半径であり、 Q_p は潮汐散逸関数と呼ばれるもので、 $1/Q_p$ は 1 周期で散逸する潮汐エネルギーに相当する。また、共回転半径よりも内側では衛星は速やかに中心惑星に落ちてしまうと考えられるので、本研究では、共回転半径よりも外側に存在し、外側への潮汐進化をたどる衛星について考えた。式 (8) から T と $a_{s,i}$ の関係を求める。 R_{SZ} は $1AU$ では $f=0.48$ として式 (6) より、 $R_{SZ} \approx 120R_J$ となる。また、 k_{2p} , Q_p の値は Barnes & O'Brien (2002) と等しくそれぞれ、 0.51 , 10^5 とし、 R_p に関しては、それぞれの質量のガス惑星の平均密度が木星の平均密度 ($\rho = 1.3 \text{ g/cm}^3$) となるように値を設定した。これらの値を用いたとき、 $a_{s,i} = 30R_J$ とす

ると $T \approx 10^{16} \text{ yr} \gg 10^9 \text{ yr}$ となり、数十億年スケールでは十分軌道安定性が保たれること推定できる。よって長期間の軌道安定性が示された。

6 Conclusion

以上の議論から、周惑星円盤の温度構造を考えることによって、5 木星質量以上のガス惑星ならば、 0.12 地球質量以上の岩石衛星が形成される可能性が高いことが示唆できた。また、タイプ II 軌道移動による短期的な衛星軌道への影響や、潮汐力による長期的な衛星軌道への影響を受けずに衛星は安定して存在していられることが示唆できた。よって、ハビタブルゾーン内に存在している系外巨大ガス惑星周りにはハビタブルムーンの存在が十分可能であることが示された。

Reference

- Barnes, J. W., & O'Brien, D. P. 2002, *ApJ*, 575, 1087
- Canup, R. M., & Ward, W. R. 2006, *Nature*, 441, 834
- Domingos, R. C., Winter, O. C., & Yokoyama, T. 2006, *MNRAS*, 373, 1227
- Ida, S., & Lin, D. N. C. 2004, *ApJ*, 604, 388
- Kasting, J. F., Whitmire, D. P., & Reynolds, R. T. 1993, *Icarus*, 101, 108
- Machida, M. N. 2009, *MNRAS*, 392, 514
- Machida, M. N., Kokubo, E., & Inutsuka, S. 2008, *ApJ*, 685, 1220
- M. Mayor, D. Queloz, 1995, *Nature*, 378, 355
- McElroy, M. B. 1972, *Science*, 175, 443
- McKay, C. P., Toon, O. B. & Kasting, J. F. 1991, *Nature*, 352, 489
- Murray, C. D., & Dermott, S. F. 2000, *Solar System Dynamics* (New York: Cambridge Univ. Press)
- Namouni, F. et al., 2010, *AJ*, 719, 145
- Sasaki, T., Stewart, G. R., & Ida, S. 2010, *ApJ*, 714, 1052
- Watson, A., Lovelock, J. E. & Margulis, L. 1978, *Biosystems*, 10, 293
- Williams, D. M., Kasting, J. F. & Wade, R. A. 1997, *Nature*, 385, 234