

系外惑星「遠い世界の物語」その8 ～中心星近傍の惑星を知る～

堀 安範^{1,2}

(要旨) 中心星近傍を周回する super-Earth は普遍的かつ豊富に存在することがわかってきた。短周期 super-Earth は剥き出しの岩石天体から大気を保持する天体まで多種多様な姿をしている。バラエティに富んだ短周期 super-Earth は一体どこで、どのようにして誕生したのだろうか。従来、惑星の質量および軌道要素の観点で議論される短周期 super-Earth の起源に対して、本稿では惑星大気という視点でその場形成および惑星移動の可能性を再検討する。

1. 中心星近傍のsuper-Earth

太陽系には火星軌道より内側に地球より大きな天体は存在しない。しかし、太陽系外に目を向けてみると、太陽系が特異な存在であるかのように、公転周期が数日程度の hot Jupiter や短周期 super-Earth が当然のように存在する。地上からの高精度視線速度測定および Kepler 宇宙望遠鏡による惑星探査から、hot Jupiter の存在頻度は恒星タイプに依らず、数%以下[1]なのに対して、太陽系近傍の太陽型星の少なくとも10%程度は短周期 super-Earth を保有することが分かってきた[2]。

ありふれた存在ともいえる短周期 super-Earth の発見は我々に1つの疑問を投げかける。これらの惑星は中心星近傍のその場で形成したのか、あるいは外側で形成した後に内側まで移動を経験したのか。この答えのカギを握るのが惑星の全体組成、すなわち惑星内部の岩石・鉄/氷比や大気量である。

質量と半径から推定される平均密度によると、大気あるいは水といった揮発性成分をある程度、保持すると考えないと説明が付かないような短周期 super-Earth が多数見られる(図1参照)。これを裏付けるよ

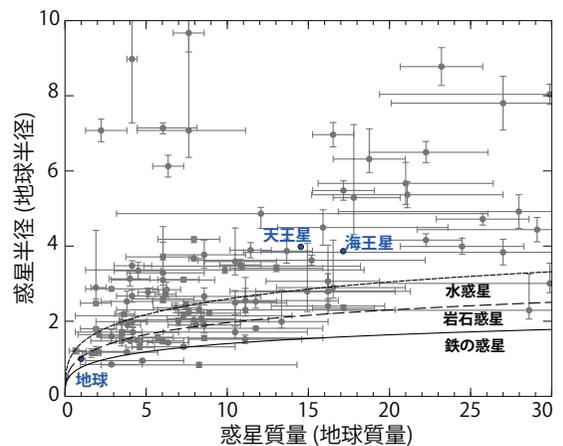


図1：短周期super-Earthの質量-半径関係。

うに、トランジット時の大気の透過光スペクトル観測から、これまでに8個(GJ1214b, GJ3470b, HAT-P-11b, GJ436b, HD97658b, 55 Cancri e, TRAPPIST-1b & c)の短周期 super-Earth で大気が存在が間接的に確認されている。観測とモデルスペクトルとの比較から予想される彼らの大気組成は、太陽系の地球型惑星とは異なり、水蒸気のような揮発性分子に富む大気あるいは水素主体の超還元的な大気を持つ可能性が高い。したがって、ベールに包まれた短周期 super-Earth がどのような経緯で誕生したかを紐解く一つの手がかりは、こうした奇異かつ適度な大気存在にあるといえる。

1. 自然科学研究機構 アストロバイオロジーセンター
2. 国立天文台 太陽系外惑星探査プロジェクト室
yasunori.hori@nao.ac.jp

もし適度な大気を持つ短周期super-Earthがその場で誕生したとすれば、中心星近傍の高温環境下で短周期super-Earthがそもそも大気を獲得できるのか。そして、もし大気を獲得できたとして、天体衝突や中心星からの届く高エネルギー粒子や強烈な紫外線およびX線照射に晒された状況下で長期間に渡って、大気を保持可能かどうか。本稿では、これらの視点に立って、中心星近傍のsuper-Earthの起源を考察していく。

2. 短周期super-Earthの大気

2.1 大気獲得

惑星が最終的に木星や土星のような分厚い大気に覆われたガス惑星になるか、薄い大気を持つ地球型惑星になるかの命運を分けた一因は、コア(中心核)質量の違いとされている。コア質量が臨界値(典型的には10倍の地球質量[3])に達すると、暴走的に周囲の円盤ガスを降着する[4]。しかし、この臨界値は惑星の形成環境、すなわち円盤ガスの温度や密度、オパシティに依存する。加えて、もし短周期super-Earthが形成後、大気流失を経験していないとすれば、彼らはガス惑星になれなかったが、多すぎない、適度な大気量(=惑星質量の10%以下)は獲得したということになる。

それでは実際に、短周期super-Earthはその場でどれくらいの円盤ガス(水素リッチな大気)を獲得できるのだろうか。図2は太陽型星から様々な距離(0.1AU, 0.25AU, 2AU)に置かれた岩石コアが獲得する円盤ガス起源の大気量を示す。原始惑星系円盤は中心星への降着、光蒸発そして円盤風といった複合的プロセスを経て散逸する。そこで、原始惑星系円盤の典型的な寿命を100万年と想定して、円盤ガス密度が時間に対して指数関数的に減衰するとした。そして、短周期super-Earthは形成の最終段階に巨大衝突を経験した可能性を考慮し、惑星は初期に任意の高エントロピー状態にあるとした。通常、惑星は冷却過程で初期の情報を忘失するため、任意の初期状態の選択は最終的な熱進化の結果に強く影響しない。最後に、地球と同様に、岩石コア内部には放射性熱源が存在する。コンドライトで生じる放射壊変熱を模擬した熱源束を岩石コア表面に与えた(これらの計算方法や条件の詳細は[5]を参照)。

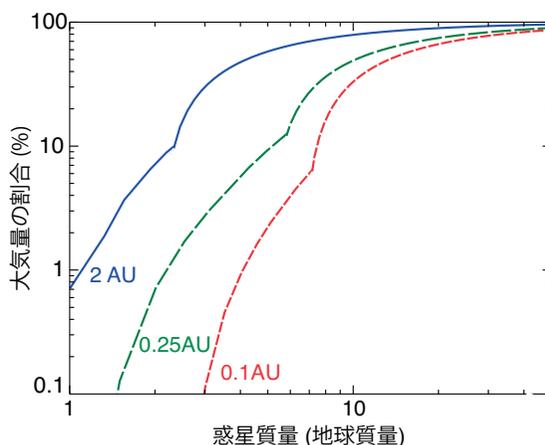


図2: 短周期super-Earthがその場で獲得する円盤ガス起源の大気量。

0.1 AU以内の高温環境でも、数倍の地球質量以上の岩石コアは(惑星質量の)1 wt%以上の水素リッチな大気を獲得できる。0.1 AU以遠の低温環境下になれば、同じ質量を持つ岩石コア質量でもより多くの大気量を獲得できる。いずれの軌道長半径の結果でも、あるコア質量を境に大気量が急激に増加する。これはガス惑星の形成時に起きる暴走ガス捕獲段階に突入するためである。この境界は大気量が概ね、10 wt%の時に位置している。言い換えると、内部構造モデルから示唆される天王星や海王星のような10-20 wt%の大気量を持つ短周期super-Earthは作りにくい。なぜなら、円盤ガスの流入は止まらず、彼らはすべからず、分厚い大気を持つ惑星になってしまう。逆に、10 wt%以下の水素リッチな大気であれば、短周期super-Earthはその場では周囲の円盤ガスから獲得可能である。

2.2 大気の散逸

さて、前小節では短周期super-Earthがその場で獲得する円盤ガス由来の水素リッチな大気について見てきた。それでは、こうした短周期super-Earthが中心星近傍領域の環境で水素リッチな大気を長期間、維持できるのだろうか。惑星から大気が流失する代表的な機構として、中心星からの紫外線やX線照射による加熱やJeans散逸(熱的散逸)、恒星風やコロナ質量放出に伴う高エネルギー粒子によるスパッタリング(非熱的散逸)、磁気流体波動による質量放出、天体衝突が挙げられる。

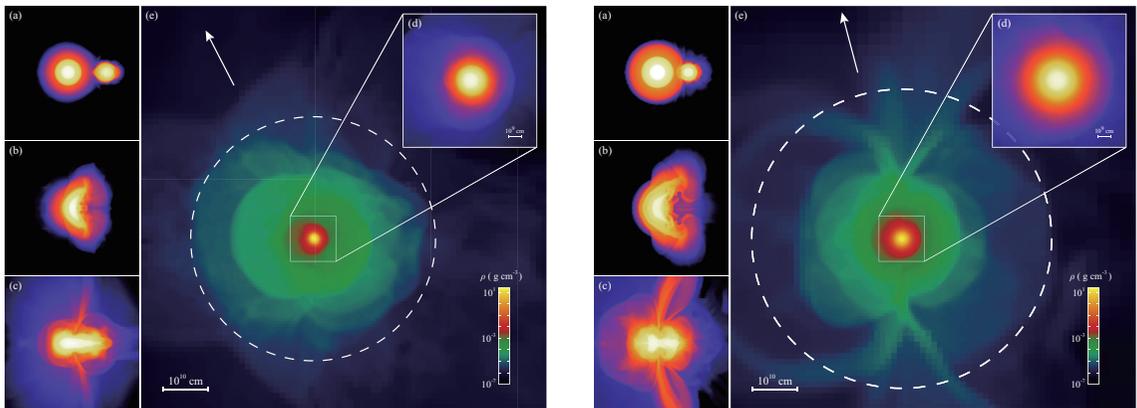


図3：太陽周りで0.1 AUに存在する短周期スーパーアースの3次元流体シミュレーション。(左図)4.3倍の地球質量に低速度の正面衝突(脱出速度)させた場合の密度の等高図：a)衝突直前，b)衝突直後，c)衝突から1.56時間後，d)衝突から18時間後。(右図)10倍の地球質量に高速度の正面衝突(3倍の脱出速度)させた場合：a)衝突開始，b)衝突から15分後，c)衝突から1.5時間後，d)衝突から21.5時間後。白破線は惑星のヒル半径，白矢印は中心星の方向を示している。いずれも目標天体は7.5 wt%のH/He大気を持ち，衝突天体は岩石天体。

短周期惑星に関しては，Jeans 散逸よりも流体力学的散逸が支配的な熱的散逸機構となる。中心星からの強烈な紫外線やX線照射による上層大気の流体力学的散逸については精力的に調べられている。ざっくりとは，0.1AU以遠にある短周期super-Earthは壊滅的な大気損失を免れる[6]。また，恒星風やコロナ質量放出と大気の相互作用の影響は惑星の固有磁場の強度にも依存するが，一般的に大気非熱的散逸は熱的散逸よりも影響は小さい。一方，磁気流体波動による質量放出は惑星自身の磁場と大気の乱流が駆動源となるため，必ずしも中心星からの距離と大気散逸は相関しない。さらに，この機構による質量散逸率は流体力学的散逸のケースと同程度になる可能性がある[7]。

最後に，天体衝突に伴う大気損失の影響はどうだろうか。惑星形成の最終段階では，火星サイズ以上の天体衝突(以下，巨大衝突)が繰り返し起きたと考えられている。こうした観点から，短周期super-Earthも同様に，巨大衝突を経験した可能性が高い。そこで，水素リッチな大気を持つ短周期super-Earthへの巨大衝突の影響を見てみる。図3は水素リッチな大気を持つ0.1 AUの短周期super-Earthに地球質量の岩石天体を衝突させた時の3次元流体シミュレーションの結果例である[8]。

短周期super-Earthが高速度衝突を経験する場合，衝撃波伝播で圧縮加熱された大気は惑星の重力圏以遠にまで拡がり，大部分の大気(～80%)が惑星から流

失する。それと同時に，惑星内部は高温且つ一様に混合された状態になる。一方，低速度衝突の場合には惑星の重力圏に滞留する大気量(～70%)は多く，惑星内部は非一様な組成分布となる。組成分布の非一様性は対流による熱輸送を障害し，非効率な熱輸送機構(例えば，二重拡散対流)が発達する可能性が高い。衝突条件の違いは惑星のその後の熱進化に対しても大きな影響を及ぼす。いずれにしても，天体衝突を経験したsuper-Earthはかなりの大気量を失うことになる。

3. 短周期super-Earthの起源

前節ではその場形成の描像に沿って，短周期super-Earthによる大気の獲得と損失を見てきた。ここで，一旦，整理すると，0.1 AU以内の短周期super-Earthはそもそも光蒸発で大気を失うとともに，獲得できる円盤ガス起源の大気量も少ない。一方で，0.1 AU以遠のsuper-Earthに関しては，光蒸発では大気を失いにくいだが，巨大衝突や磁気流体波動による質量放出で多かれ少なかれ大気を失う。ガス円盤から大気を獲得しやすい点を考慮すると，場合に依っては適度な水素リッチな大気量は実現されるかもしれない。しかし，これまでに大気の存在が示唆される短周期super-Earthのすべては0.1 AUよりも遥かに内側領域に存在する。その場形成の立場だけで，彼らの多すぎない大気量が無矛盾に説明しようとする微調整あるいは

工夫が必要になる。

それでは、外側領域で十分に大きなコアまで成長した後、大気をまとい(ながら)、最終的に現在の位置に現在の大気量を持った短周期super-Earthが誕生したと考えればよいかという問題はそれほど単純ではない。外側の低温領域では、super-Earthのような大きなコアは多すぎない大気量ではなく、多すぎる分厚い大気をまとう可能性が高い。さらに、惑星移動説の場合もその場形成と同様、大気散逸は必然的に起きる。また、少なくとも複数惑星系で平均運動共鳴の関係にあれば、惑星移動の傍証となるが、残念ながら、適度な大気を持つ、いずれの短周期super-Earthにもこうした尽数関係が見られない。短周期super-Earthが過去に惑星移動した可能性は排除されないが、決定打に欠ける。こうした現状を打開する手立てとして、短周期super-Earthの内部組成を知ることができれば、例えば氷主体の惑星か否か、彼らの形成環境を制約できる。実際にGJ 1214bで試みられたような、潮汐変形を左右するLove数の推定[9]は今後の有効な手段といえる。

4. 今後の展望

Kepler宇宙望遠鏡の活躍で短周期super-Earthの発見数は飛躍的に増加した。しかし、それらの多くは非常に暗く、地上からフォローアップ観測するのは困難である。そのため、大気の有無や大気組成の推定といった惑星の特徴付けに成功した短周期super-Earthはこれまでにわずか8例しかない。今後、2017年に打上げ予定の全天惑星探査を目指したTESSによって、地上望遠鏡からフォローアップ観測可能な短周期super-Earthが多数発見されると期待される。それによって、8例から見えていた短周期super-Earthの姿が一般的なsuper-Earthの特徴を表しているかどうか明らかになるはずである。同時に、太陽系の地球型惑星は特別な存在なのかに対する答えも得られるはずである。そして、太陽系外の短周期super-Earthの真の姿を通して、混沌とした状態の惑星移動を含む惑星形成論が大きく進展することを期待する。

謝辞

今回、本稿の執筆機会をくださり、原稿を注意深く読んでいただいた成田憲保氏に感謝いたします。また、本稿で紹介した研究に携わっていただいた共同研究者の方々にこの場を借りて、感謝いたします。本研究の一部は日本学術振興会からの助成を受けております。

参考文献

- [1] Howard, A. W. et al., 2010, Nature 330, 653.
- [2] Petigura, E. A. et al., 2013, PNAS 110 (48), 19273.
- [3] Ikoma, M. et al., 2000, ApJ 537, 1013.
- [4] Pollack, J. B. et al., 1996, Icarus 124, 62.
- [5] Ikoma, M. and Hori, Y., 2012, ApJ 753, 66.
- [6] Owen, J. E. and Wu, Y., 2013, ApJ 775, 105.
- [7] Tanaka, Y. A. et al., 2014, ApJ 792, 18.
- [8] Liu, S-F. et al., 2015, ApJ 812, 164.
- [9] Nettelmann, N. et al., 2011, ApJ 733, 2.