

スーパーアースの限界質量と限界半径

黒崎 健二 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

宇宙望遠鏡 (CoRoT や Kepler) による観測により, 多数の系外惑星が発見されており, それらの惑星の質量-半径の多様性から, 惑星の組成に対する多様性も示唆されてきた. その中でも, 惑星が水を保持できるかどうかを議論することは, 観測の面からも形成論の面からも重要な問題である. 本研究では, 内側から岩石コア, 水マントル, 水蒸気大気を持つ, 水に富む惑星の構造計算と熱進化, 質量散逸を計算し, 惑星の質量-半径関係および惑星が水を保持できる限界質量を求めた. 本研究では (1) 惑星が水を保持できる限界質量および (2) 理論的に求めた限界質量とその半径を観測データと比較して惑星が水を保持できる領域の制約を行う. 本研究により, 惑星が水を保持できる限界質量の最小値を求めることができた. 本研究から理論的に求められた質量-半径関係と観測された系外惑星を比較すると, 水を保持した惑星の質量-半径関係図上における存在可能領域を制約することができる. また, 軌道長半径-質量関係図や軌道長半径-惑星半径関係図から, 岩石惑星である可能性が高い領域を制約することもできた. 本研究の成果は, 惑星の組成や起源に関する議論や, 今後の観測ターゲットを選択する上で有益な情報を与えることが期待される.

1 背景

近年の観測技術の向上により, 多数の系外惑星が発見されるようになっており, 特に質量が地球の数倍程度の大きさの系外惑星も発見されてきている. トランジット観測から半径が求まるため, 質量と半径の情報を組み合わせることで, 系外惑星の平均密度を求めることができ, 系外惑星の組成についての議論ができるようになった. 小質量の系外惑星は主に 0.1AU 以内の中心星近傍で発見されているが, これらの惑星の中には, その質量と半径の関係から, 揮発性成分を多量に含むと考えられる惑星もあり, 水に富むと考えられる惑星も存在し (GJ1214b: Nettelmann et al. (2010) など), 惑星の組成は起源を議論する上で重要である. これら小質量の系外惑星に対する構造計算や熱進化計算は個別の惑星 (CoRoT-7 b: Valencia et al. 2010, Kepler-11 系の惑星: Lopez et al. 2012) に対して議論されてきたが, 質量-半径関係図上において, 観測データの分布を質量散逸も考慮して推定する議論はまだない. そこで本研究では, 水に富むスーパーアースの質量散逸に対する安定性を計算し, 水エンベロープを保持できる条件を求めた. そして, 軌道長半径-質量および軌道長半径-惑星半径関係上での系外惑星について, 惑星の組成についてのどの

ような制約を与えることができるかを議論する.

2 計算モデル

本研究では惑星の内部構造・大気構造の熱進化と質量散逸を同時に解くことにより, 形成初期の状態からの惑星質量・半径の進化を追跡する. 惑星は水蒸気大気, 水エンベロープ, 岩石コアの 3 層構造をなすと仮定する (図 1). 以下, 惑星の内部構造および熱進化モデル (§2.1) と質量散逸のモデル (§2.2) について記述する.

2.1 内部構造・熱進化モデル

静水圧平衡を保つ惑星内部構造は,

$$\frac{\partial P}{\partial M_r} = -\frac{GM_r}{4\pi r^4} \quad (1)$$

$$\frac{\partial r}{\partial M_r} = \frac{1}{4\pi r^2 \rho} \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial M_r} = -\frac{GM_r T}{4\pi r^4 P} \nabla \quad (3)$$

$$\rho = \rho(P, T) \quad (4)$$

によって表される. このとき, M_r は質量座標, P は圧力, r は半径, T は温度, ρ は密度をそれぞれ表し

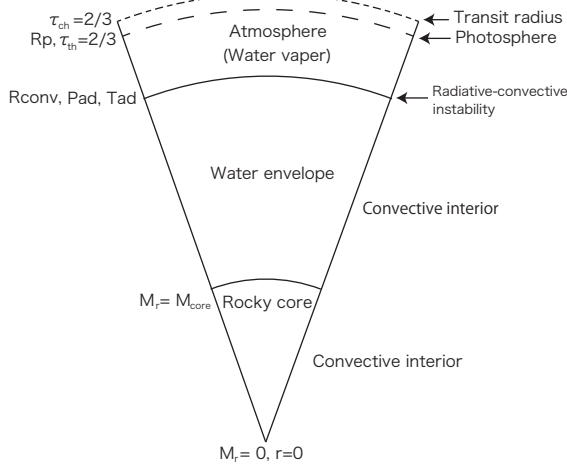


図 1: 惑星内部構造の模式図

ている．また， ∇ は圧力に対する温度勾配を表している．惑星内部では対流が発達していると考えられるので，惑星内部では断熱温度勾配によって表される．境界条件は中心部 ($M_r = 0$ において $r = 0$) および対流圏界面 ($M_r = M_p$ において P_{ad}, T_{ad}) を設定する．(1)-(4) 式を解くことで，惑星中心から対流圏界面までの距離 R_{conv} を求めることができる．

対流圏界面の位置は大気構造を解くことによって決める．惑星大気モデルは Guillot (2010) により導かれた，輻射モーメント方程式を解いて計算した．吸収係数は HITRAN のデータベースを $\kappa(P, T) = \kappa_0 P^a T^b$ の関数形に近似させて求めたものを使用した．対流圏界面は Schwarzschild criterion を用いて評価し， $\nabla = \nabla_{ad}$ となる場所を対流圏界面とした．惑星大気構造を解くことで，惑星大気の厚み dz を評価することができる．したがって，惑星半径は $R_p = R_{conv} + dz$ として求めることができる． dz は観測と比較するときにはトランジット半径を，惑星の熱進化や質量散逸に対しては光球面までの厚みとして評価する．

惑星内部及び惑星大気の状態方程式は H_2O は理想気体 (Hori&ikoma 2011), H_2O R-EOS (French et al. 2009), SESAME 7150 (Lyon&Johnson 1992) をそれぞれ適切な範囲で用いている．また岩石の状態方程式は Valencia et al. (2009) を用いており，0.1Gyr 以前はフラックスが一定と仮定した．

惑星の熱進化は

$$L_p = \frac{\partial \bar{S}_e}{\partial t} \int_{M_c}^{M_p} T dM_r + \frac{\partial \bar{S}_c}{\partial t} \int_0^{M_c} T dM_r \quad (5)$$

を計算することによって，冷却の時間を計算することができる．このとき， M_p, M_c はそれぞれ惑星質量およびコア質量， \bar{S}_e, \bar{S}_c はそれぞれエンベロープおよびコアのエントロピー， L_p は惑星放射である．

2.2 質量散逸モデル

惑星の質量散逸はエネルギー律速による流体力学的散逸を議論する．Erkaev et al. (2007) から

$$\dot{M} = -\frac{3\varepsilon F_{XUV}}{4G\rho_{pl}K_{tide}} \quad (6)$$

を用いる．このとき， ε は散逸効率， F_{XUV} は X 線および UV のフラックス， ρ_{pl} は惑星平均密度， K_{tide} は潮汐による効果である．また，XUV フラックスは Ribas et al. (2005) のモデルを用いた．

3 計算結果

以下，惑星の質量散逸と熱進化を計算した結果を述べる．惑星の初期状態は惑星質量 M_p ，惑星初期放射強度 $L_{p,0}$ ，初期水量 X_{wt} ，軌道長半径 a によって決まる．本研究では，基準となる値として $L_{p,0} = 1 \times 10^{24} \text{erg/s}$ ， $X_{wt,0} = 75\%$ ， $a = 0.1 \text{AU}$ とする．また質量散逸効率 $\varepsilon = 0.1$ と仮定して計算をおこなう．

3.1 質量進化の計算例

図 2 は質量の時間進化を表す．初期質量がある質量よりも小さいと水エンベロープを全て失ってしまうことがわかった．10Gyr 後にちょうど水エンベロープを失う初期質量を本研究では限界質量 M_{thrs} とよぶ． $L_{p,0} = 1 \times 10^{24} \text{erg/s}$ ， $X_{wt,0} = 75\%$ ， $a = 0.1 \text{AU}$ ， $\varepsilon = 0.1$ の場合， $M_{thrs} = 0.56 M_{\oplus}$ と求まった． M_{thrs} のパラメータ依存性を調べてみると， $L_{p,0}$ にはほとんど依存しないことや X_{wt} の値により最小値があることもわかった (図 3)．この最小値 M_{thrs}^* は軌道長半径 a と散逸効率 ε に依存しており， $L_{p,0}$ や $X_{wt,0}$ には依存しない．

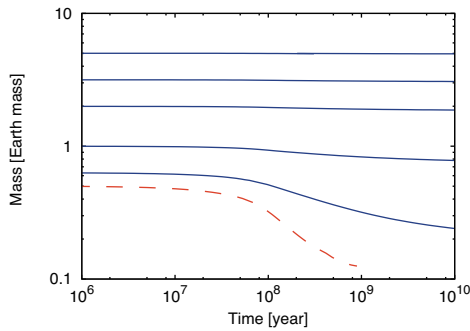


図 2: 質量の時間進化．青は水エンベロープを 10 億年保持できる惑星，赤は 10 億年までに水エンベロープを全て失ってしまう惑星． $L_{p,0} = 1 \times 10^{24}$ erg/s, $X_{\text{wt},0} = 75\%$, $a = 0.1\text{AU}$, $\epsilon = 0.1$ と仮定した．

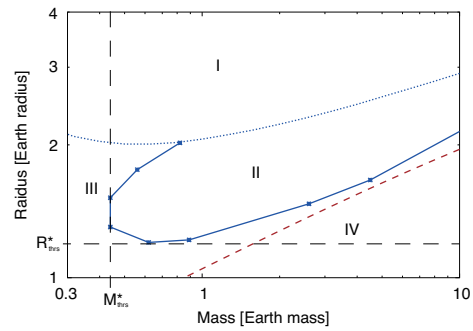


図 4: 初期水量と限界質量の関係．線の色は軌道長半径の違いを表しており，赤は 0.02AU，緑は 0.03AU，青は 0.05AU，紫は 0.1AU である．また， $L_{p,0} = 1 \times 10^{24}$ erg/s, $\epsilon = 0.1$ と仮定した．

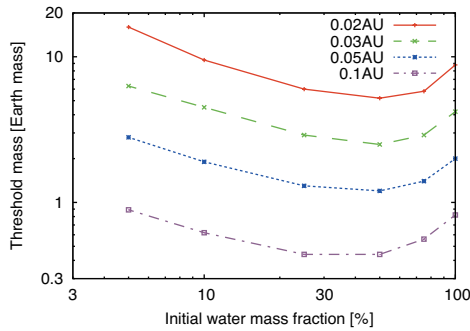


図 3: 初期水量と限界質量の関係．線の色は軌道長半径の違いを表しており，赤は 0.02AU，緑は 0.03AU，青は 0.05AU，紫は 0.1AU である．また， $L_{p,0} = 1 \times 10^{24}$ erg/s, $\epsilon = 0.1$ と仮定した．

3.2 限界質量と限界半径

図 4 は M_{thrs} とそれに対応する半径を表している．以下，その半径を閾値半径 R_{thrs} と呼ぶ．質量-半径関係上で見ると，惑星は以下の 4 つの領域に分けることができる．

- I 水素ヘリウムエンベロープを保持している惑星．
- II 水エンベロープを長期間保持できる惑星．
- III 水エンベロープが長期間保持できず，10Gyr 以内に全て散逸してしまう惑星．
- IV 岩石や鉄が主成分となる惑星．

グラフから， R_{thrs} も最小値 R_{thrs}^* を持つことがわかった．

4 議論

限界質量の最小値 M_{thrs}^* および限界半径の最小値 R_{thrs}^* を観測と比較する．限界質量・半径の最小値よりも質量・半径が小さい場合，惑星は初期水量に関わらず水エンベロープを全て失ってしまい，岩石主体の惑星であることが予想される．図 5 は限界質量の最小値と軌道長半径の関係を表している． $\epsilon = 0.1$ では，いくつかの惑星（Cen B b, HD10180 b, Kepler-10 b and CoRoT-7 b）は，限界質量よりも質量が小さいが， $\epsilon = 0.01$ とすると限界質量よりも大きくなってしまふ．散逸効率の不定性のため，現在までに観測されている惑星の組成に対して制約を直接与えることは難しいが，今後観測される低質量惑星に対しては岩石主体であることを予測することが可能であると期待される．図 6 は閾値半径の最小値と軌道長半径の関係を表している．限界半径の値よりも有意に半径が小さい候補天体が多数発見されており，ケプラーの観測から岩石惑星が多数発見されていることが明らかになった．一般に惑星半径だけからでは惑星の組成に対して制約することはできないが，質量散逸の安定性を考慮することで，ケプラー候補天体の組成に対して制約可能であることがわかった．

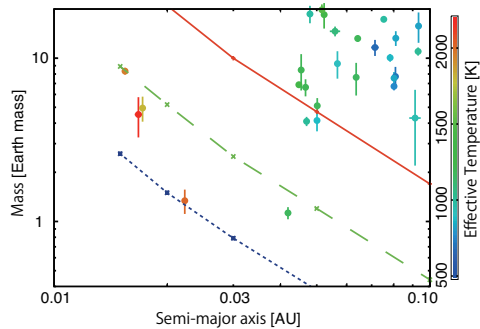


図 5: 限界質量の最小値と軌道長半径の関係．図中の点は観測された系外惑星を表している (<http://exoplanets.org> より)．線の色は散逸効率を表しており，赤は $\epsilon = 1$ ，緑は $\epsilon = 0.1$ ，青は $\epsilon = 0.01$ を表している．

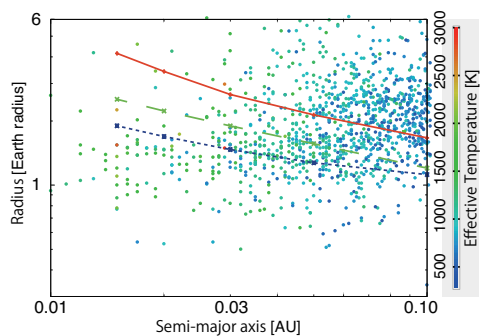


図 6: 限界半径の最小値と軌道長半径の関係．図中の点はケプラー候補天体を表している (<http://planetquest.jpl.nasa.gov/kepler> より)．線の色は散逸効率を表しており，赤は $\epsilon = 1$ ，緑は $\epsilon = 0.1$ ，青は $\epsilon = 0.01$ を表している．

5 結論

本研究は水マントルと岩石コアからなるスーパーアースの質量散逸に対する安定性を議論した．その結果，惑星の初期質量が限界質量 M_{thrs} よりも小さいと水を全て失ってしまうことがわかり， M_{thrs} には初期水量に応じて最小値があることがわかった．また， M_{thrs} に対応する惑星半径 R_{thrs} を求めることにより，質量-半径関係図上において，水エンベロープを保持可能な領域を推定することができた．散逸

効率 ϵ や XUV フラックスの不定性により，観測された系外惑星の組成を制約することは難しい．しかし，そのような不定性を考慮しても，ケプラー候補天体には多数の岩石惑星が含まれていることは確実である．本研究の結果は将来的に地球型惑星の観測をする上で重要な情報をもたらすことが期待される．

謝辞

本研究は水の状態方程式を Nadine Nettelmann から提供していただいた．また，本研究を遂行するにあたり生駒大洋准教授，堀安範研究員から多くの助言をいただいております，グローバル COE プログラム ”地球から地球たちへ” による援助を受けた．

Reference

- Erkaev, N. V., Kulikov, Y. N., Lammer, H., et al. 2007, *A&A*, 472, 329
- Fortney, J. J., Marley, M. S., & Barnes, J. W. 2007, *APJ*, 659, 1661
- French, M., Mattsson, T. R., Nettelmann, N., & Redmer, R. 2009, *PhRvB*, 79, 054107
- Guillot, T. 2010, *A&A*, 520, A27
- Hori, Y., & Ikoma, M. 2011, *MNRS*, 416, 1419
- Hubbard, W. B. 1978, *Icarus*, 35, 177
- Hubbard, W. B., & Macfarlane, J. J. 1980, *JGR*, 85, 225
- Kippenhahn, R., & Weigert, A. 1990, *Stellar Structure and Evolution*, XVI, 468 pp. 192 figs.. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. Also *Astronomy and Astrophysics Library*,
- Lopez, E. D., Fortney, J. J., & Miller, N. 2012, *APJ*, 761, 59
- Lopez, E., & Fortney, J. 2013, arXiv:1305.0269
- Ribas, I., Guinan, E. F., Güdel, M., & Audard, M. 2005, *APJ*, 622, 680
- Rogers, L. A., Bodenheimer, P., Lissauer, J. J., & Seager, S. 2011, *APJ*, 738, 59
- Valencia, D., Ikoma, M., Guillot, T., & Nettelmann, N. 2010, *A&A*, 516, A20