

木星形成条件

10xMMSN

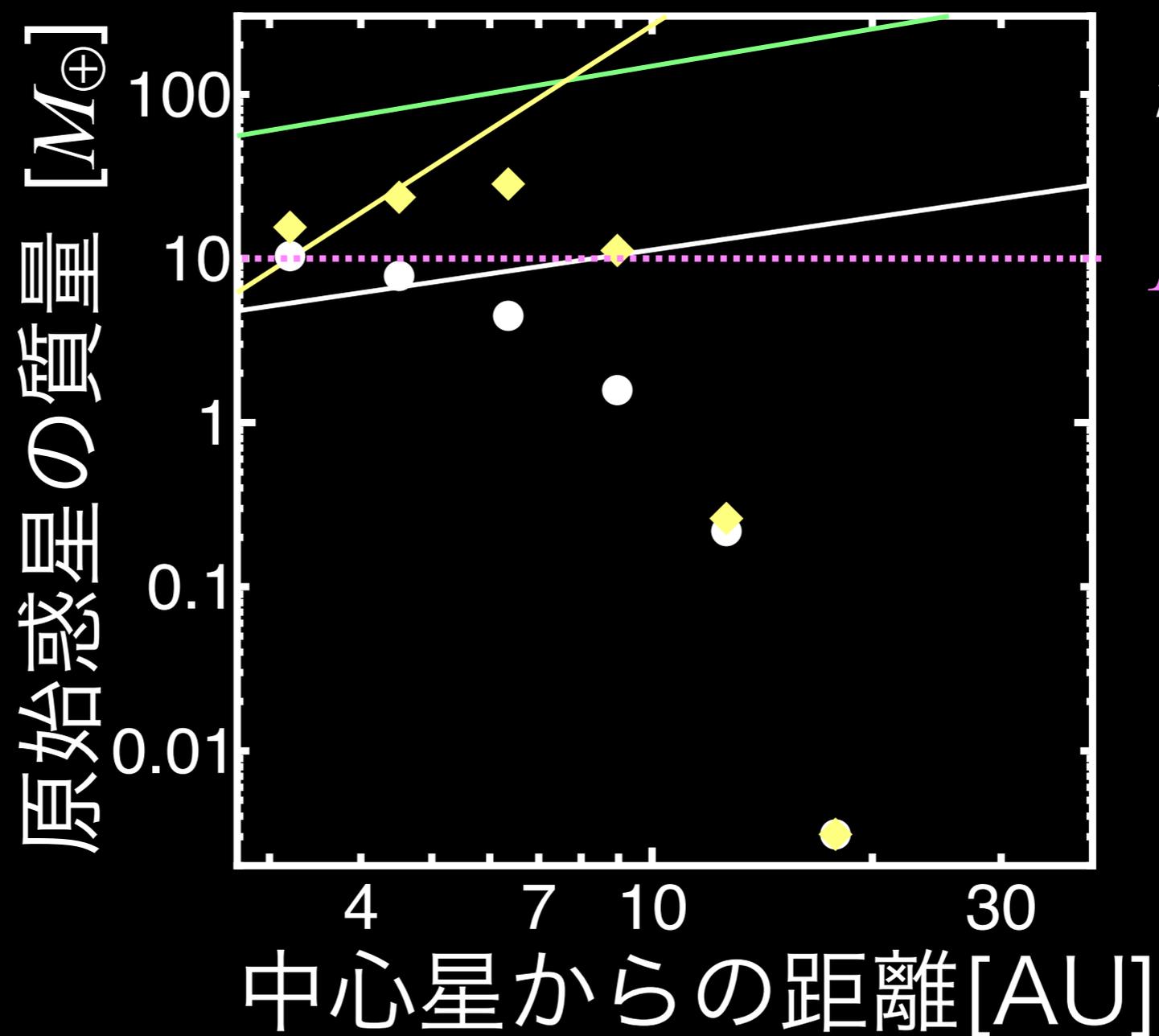
$r_0 = 100 \text{ km}$

一千万年後

- ◆ 大気
- なし

解析解

- 大気
- なし



M_{crit}

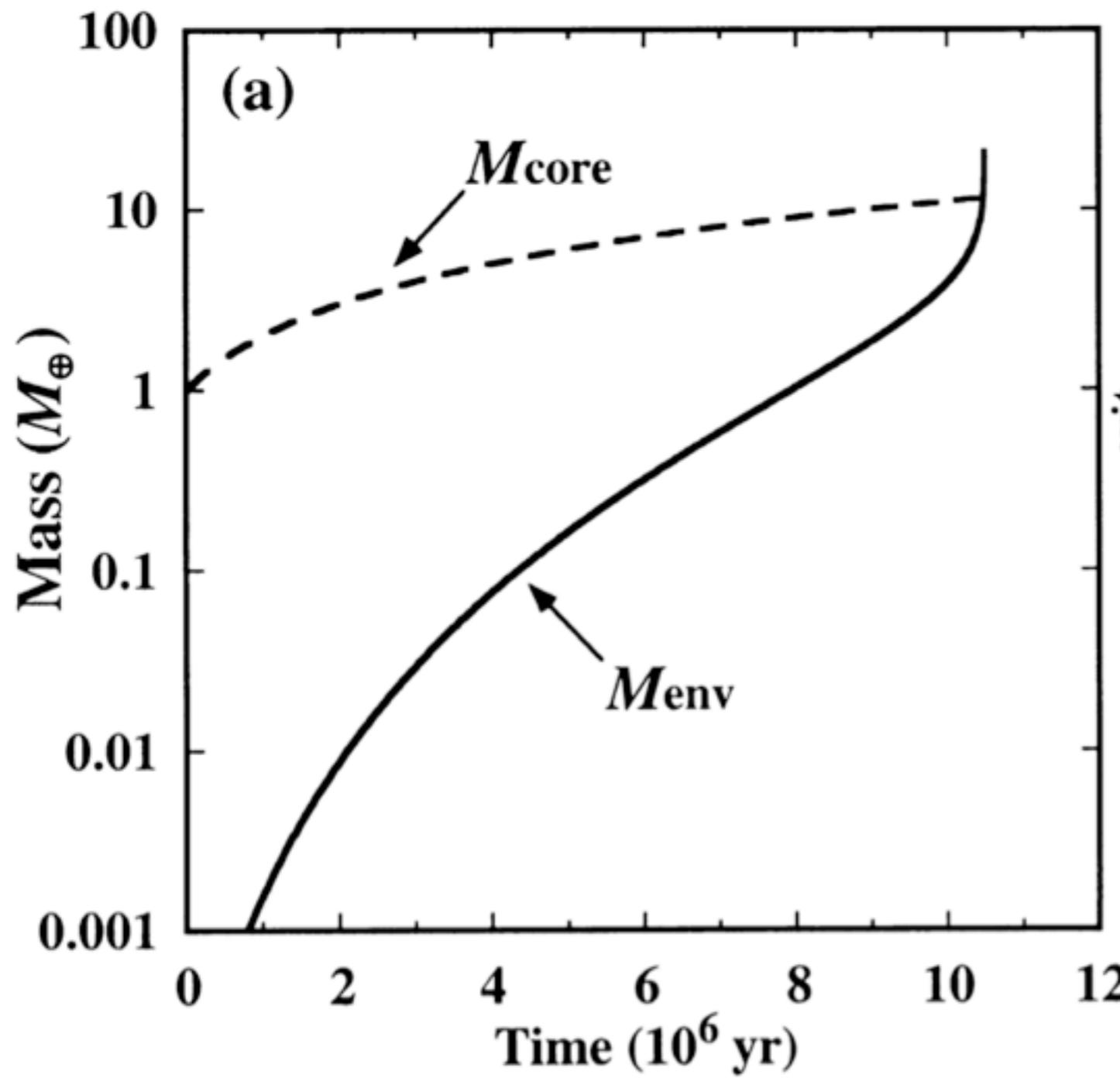
(Kobayashi et al. 2012)

10倍の林モデル、100km程度の微惑星ならば固体核形成可能

ガス集積

臨界固体核質量

(Mizuno et al. 1978; Mizuno 1980)



$$\dot{M}_{\text{core}} = 10^{-6} M_{\oplus} / \text{yr}$$

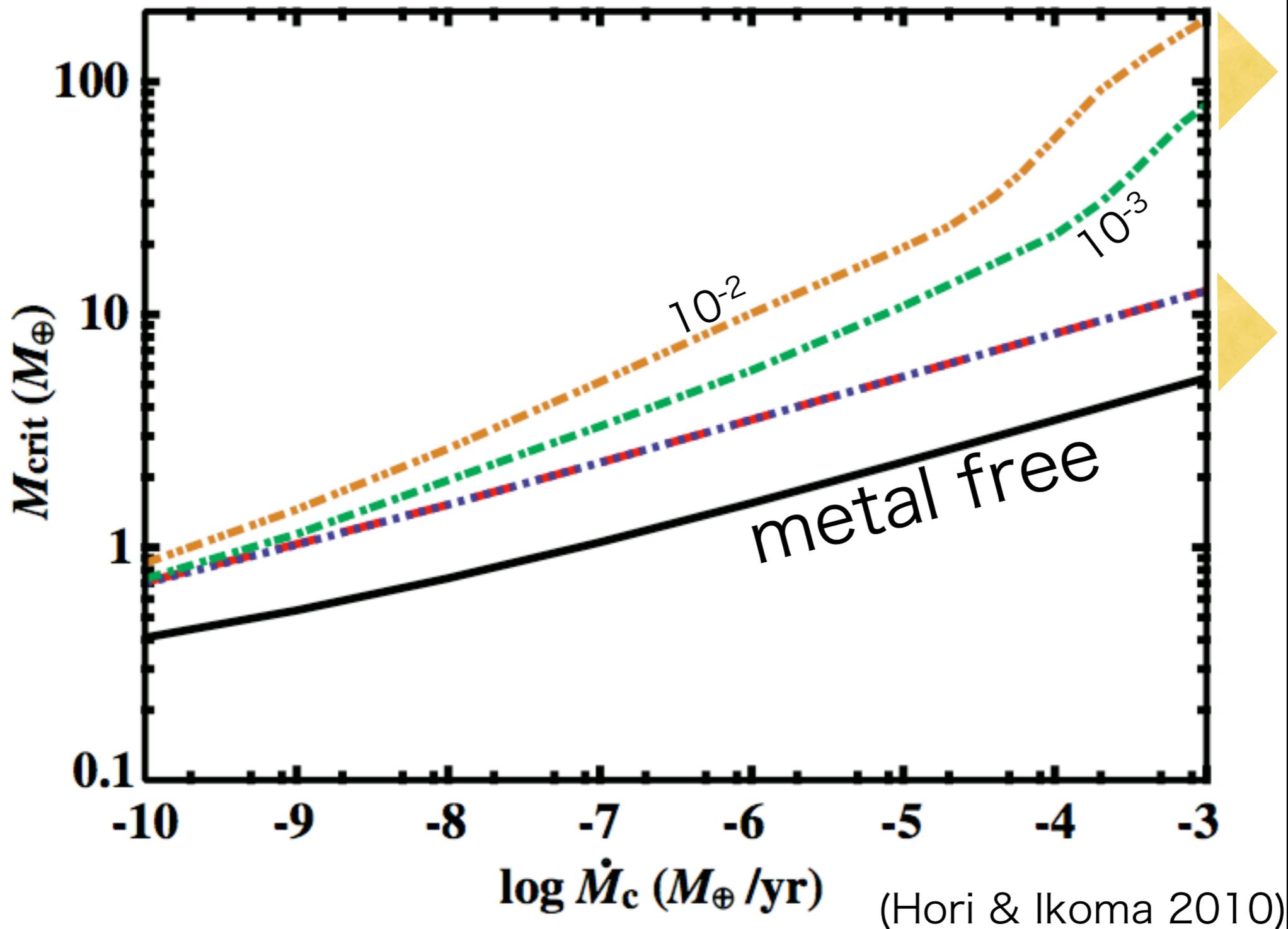
$$\kappa = 1 \text{ cm}^2 / \text{g}$$

の結果

~10倍の地球質量で
暴走ガス流入が始まる

(Ikoma et al. 2000)

臨界質量の依存性

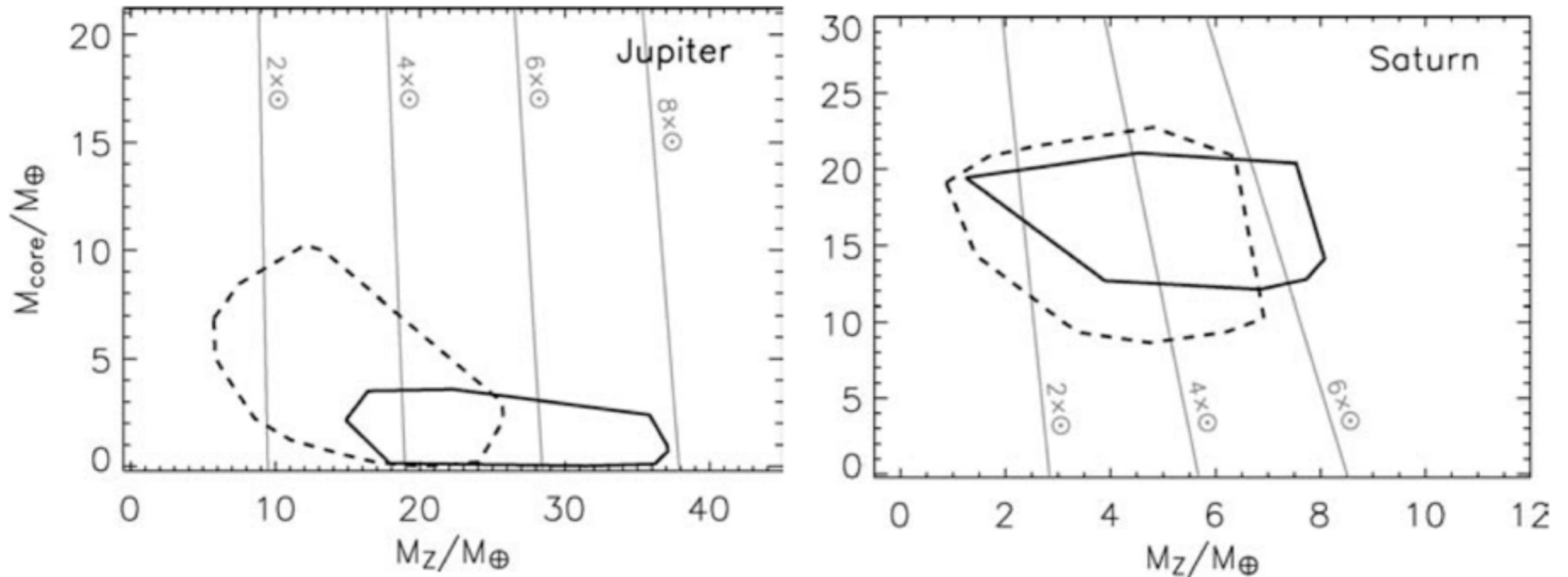


+dust

gas

さらに、氷の昇華による汚染 (Hori & Ikoma 2011)

木星型惑星の固体核



土星の方が木星よりも固体核が大きい！

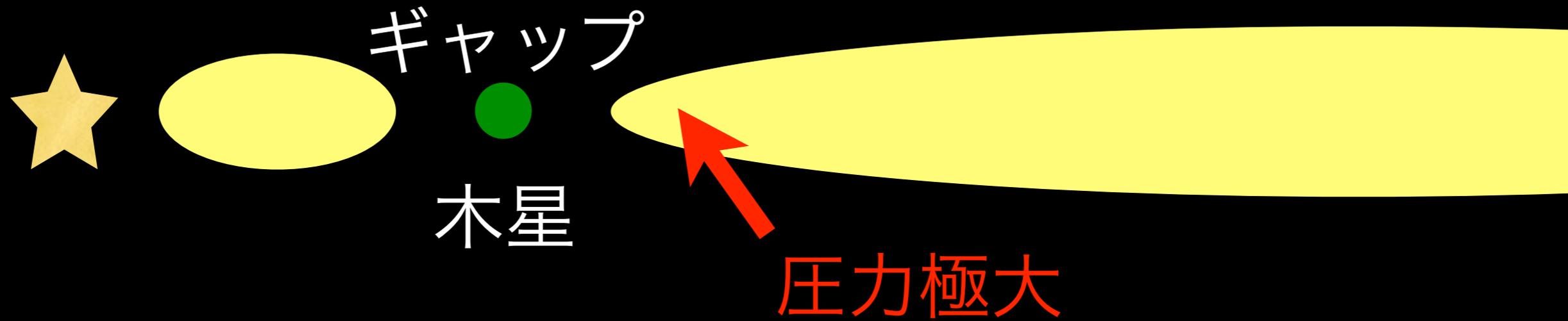
(Guillot 2005)

土星形成の困難

- 木星はほとんど移動していない。
- $t_{\text{形成}} \sim t_{\text{円盤寿命}}$ (Ida & Lin 2004).
- その後、形成される土星はガス降着可能か？
- 土星の固体核が大きい (Guillot 2005).
- 固体核の急速成長によりガス降着が遅れると最終的固体核が大きくなる (Ikoma et al. 2000).

土星は急速成長した固体核($\sim 10 M_{\oplus}$)から
形成されなくてはならない！

木星形成の最終期



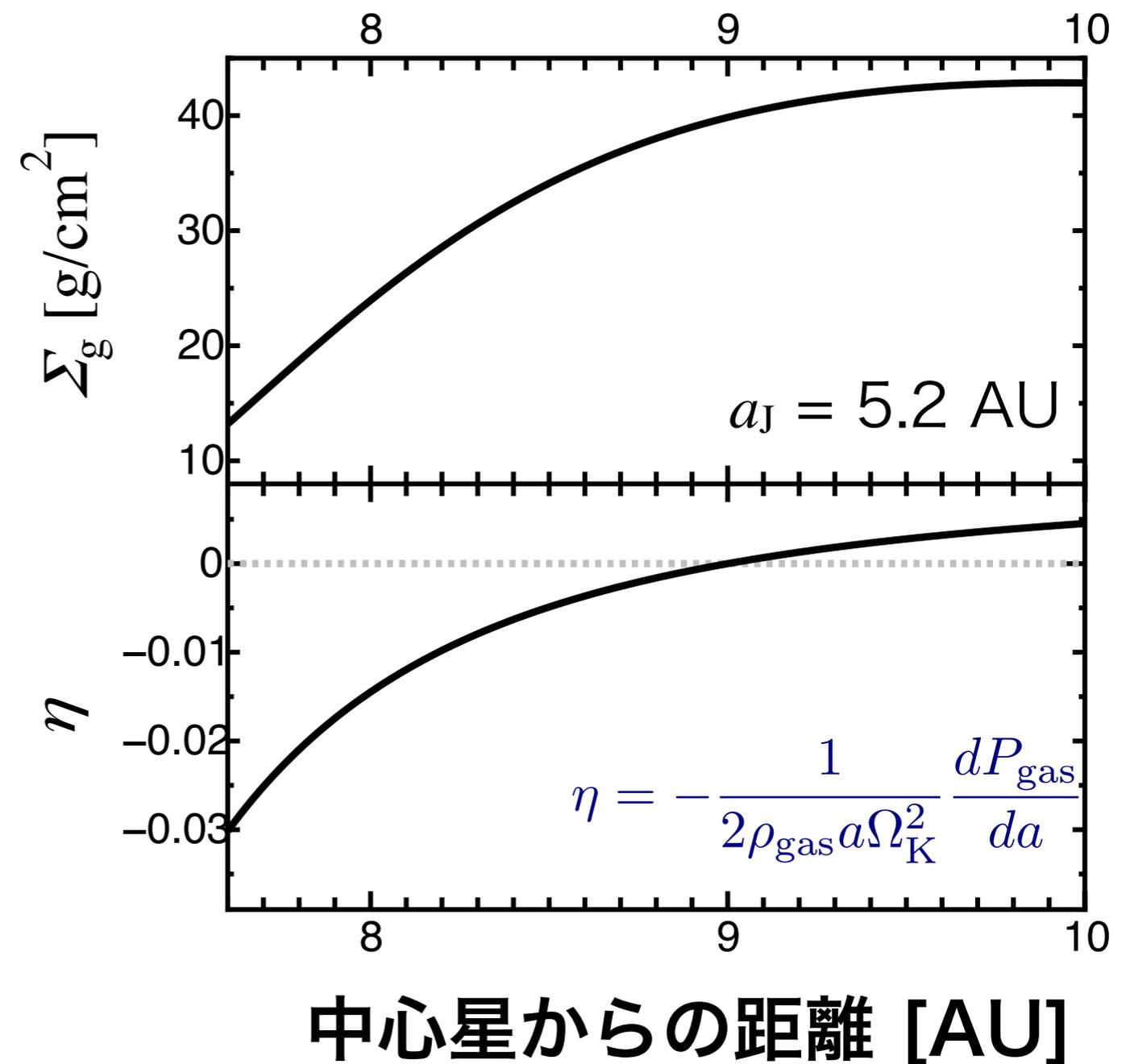
ガス降着して木星が大きくなると円盤にギャップをあけて、ガス流入が止まる。そして、ギャップの端には圧力極大ができる (Tanigawa & Ikoma 2007)。

木星のつくる円盤ギャップ

Model : Tanigawa & Ikoma (2007)

$$\Sigma_{\infty} \propto a^{-1.5}, c \propto a^{-0.25}, \alpha = 0.00007$$

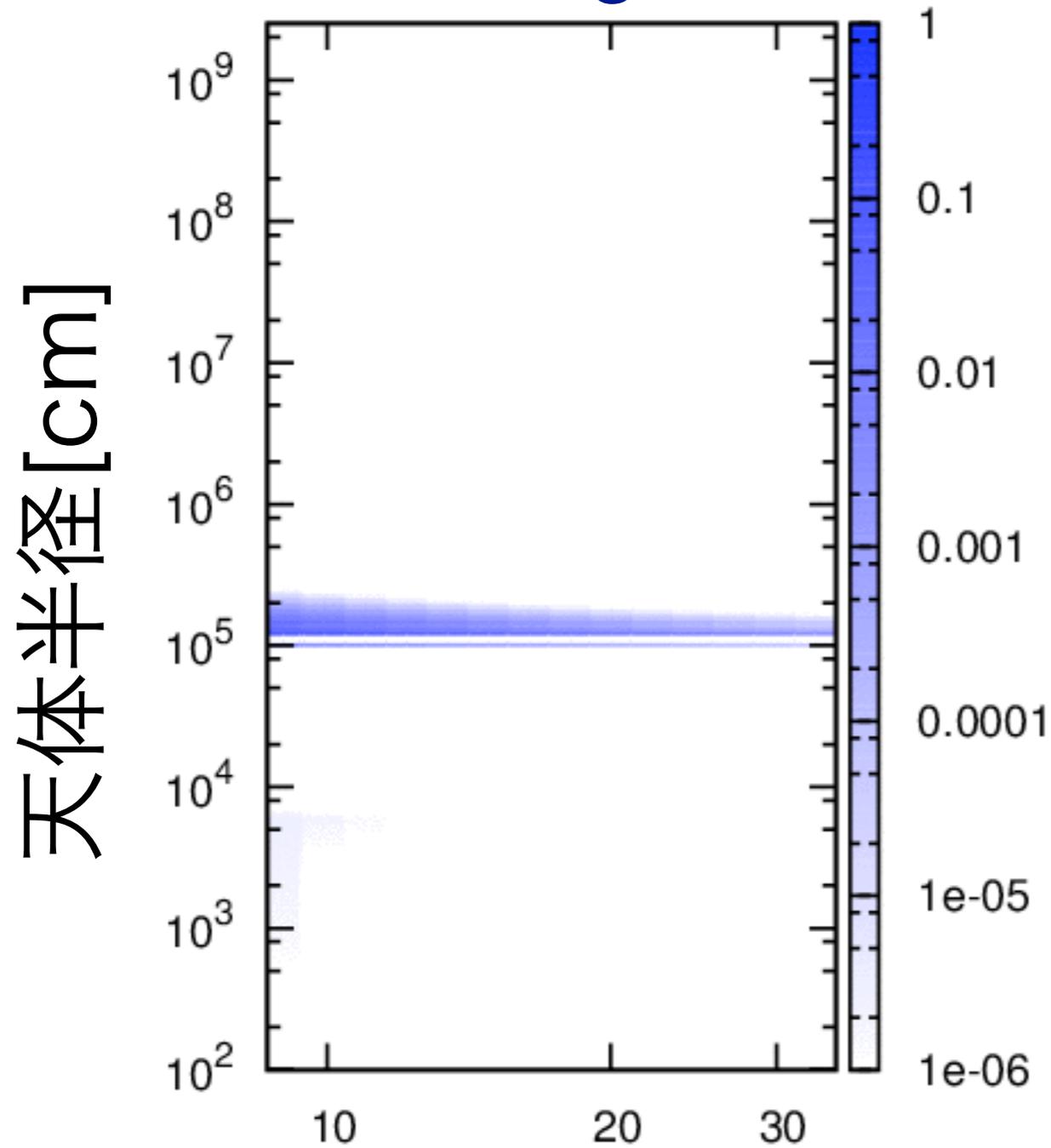
- 円盤にギャップを作り木星のガス集積は止まる。
- ギャップの淵での圧カプロファイルがガス円盤の公転速度が変える。
- 圧力極大の位置ではガスはケプラー速度で公転するため、ガス抵抗により天体が集まる。



ギャップ込みの計算

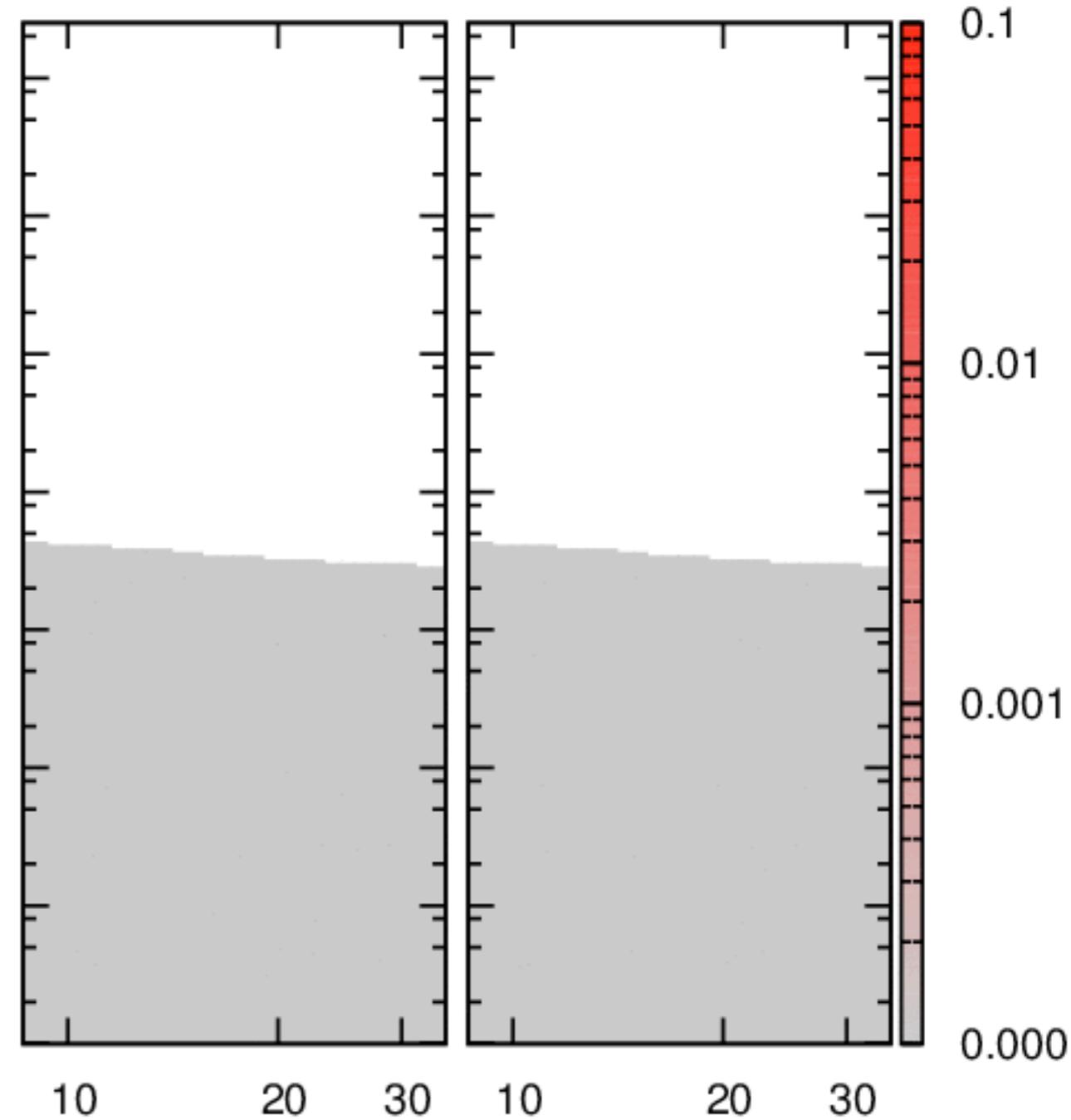
時間 1896.88 years

面密度 [g/cm²]



離心率

傾斜角



中心星からの距離 [AU]

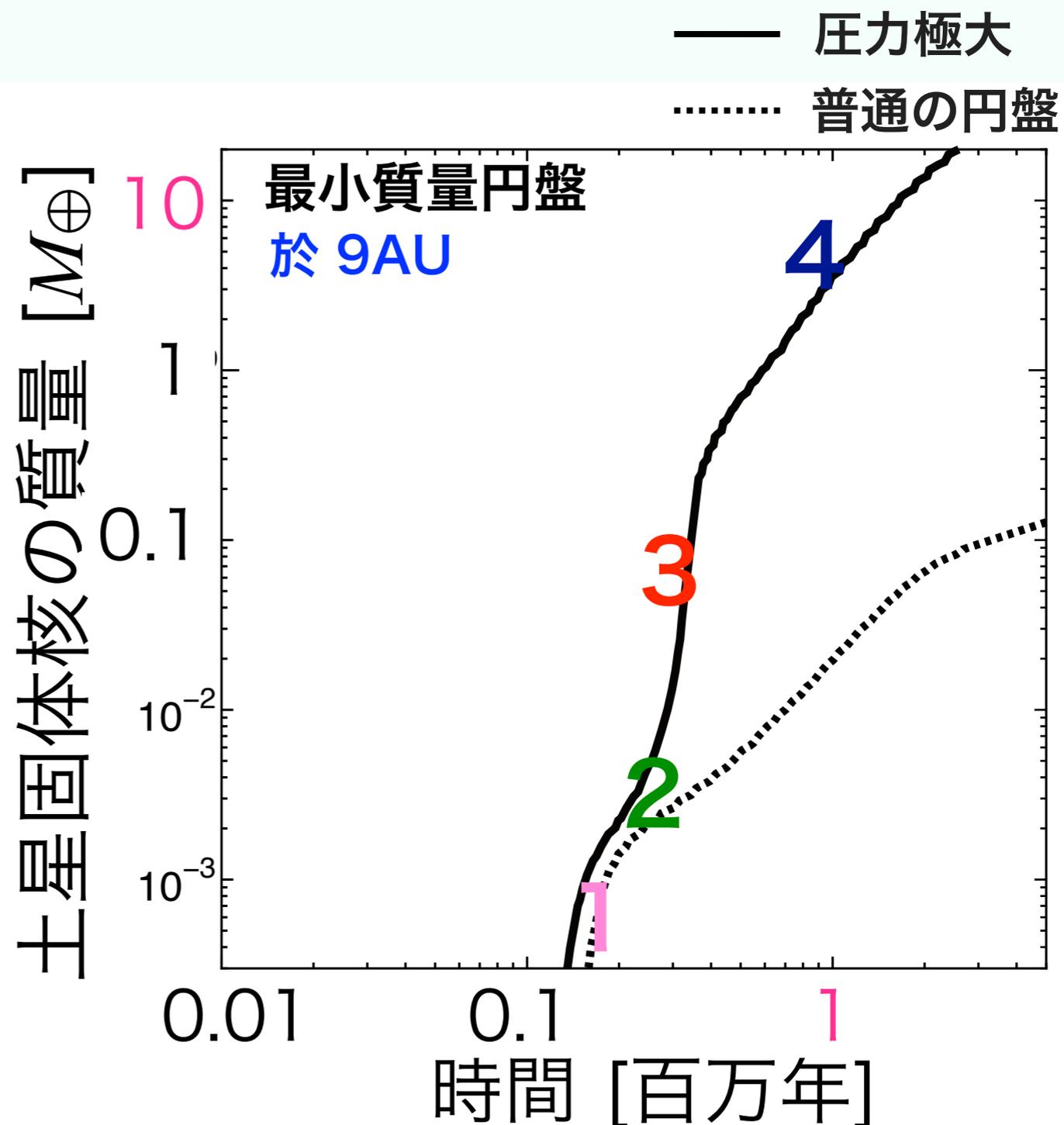
土星固体核の成長

1. 暴走成長

2. 寡占的成長

3. 破片集積による成長

4. 外側の円盤からの供給

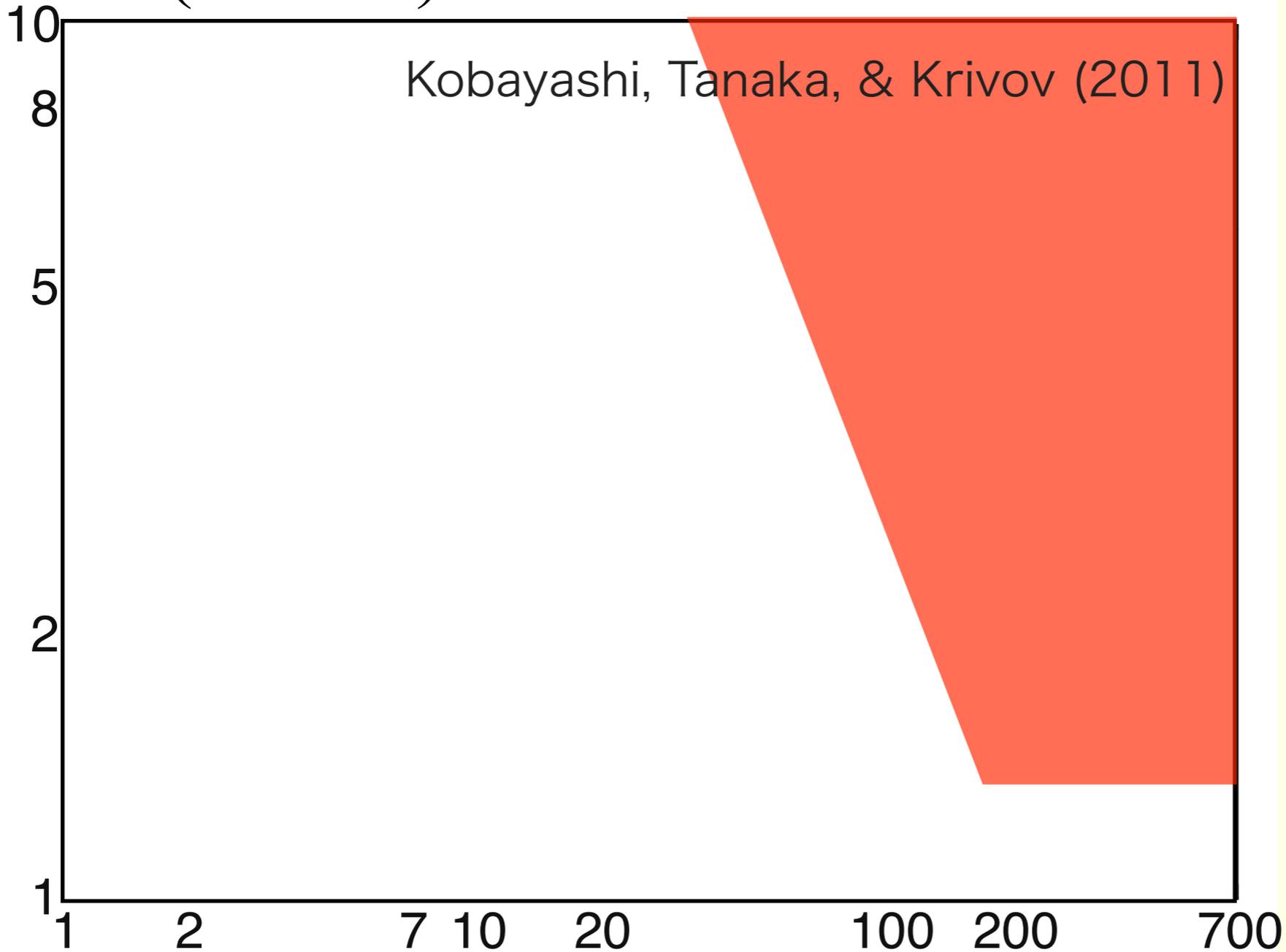


最小質量モデルで1km初期微惑星ならば、百万年で土星固体核を形成

木星形成条件

$$\Sigma = x \Sigma_{\text{MMSN}} (a/1 \text{ AU})^{-1.5}$$

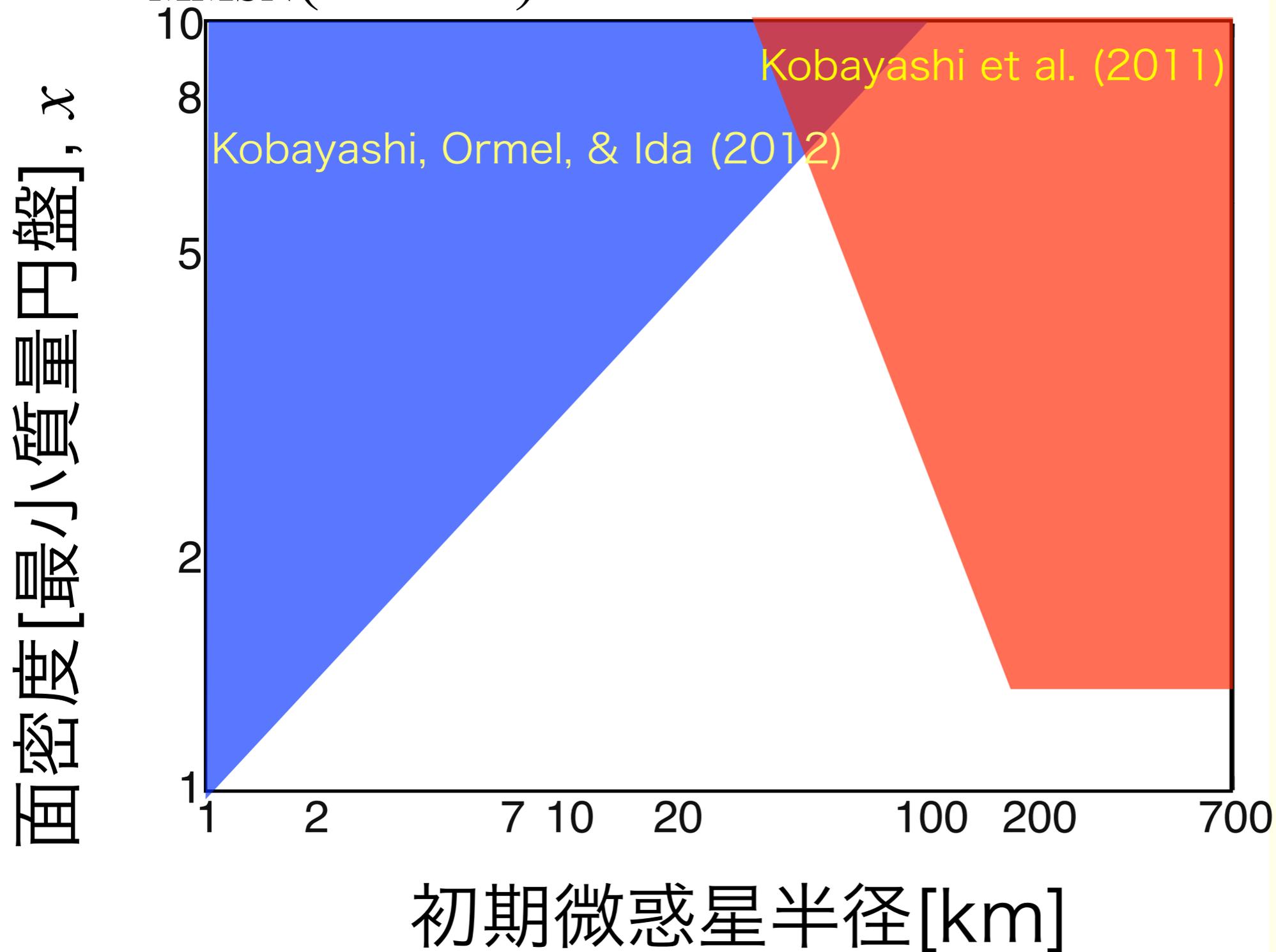
面密度[最小質量円盤], x



- 木星
 - ガス捕獲
 - 5地球質量

土星形成条件

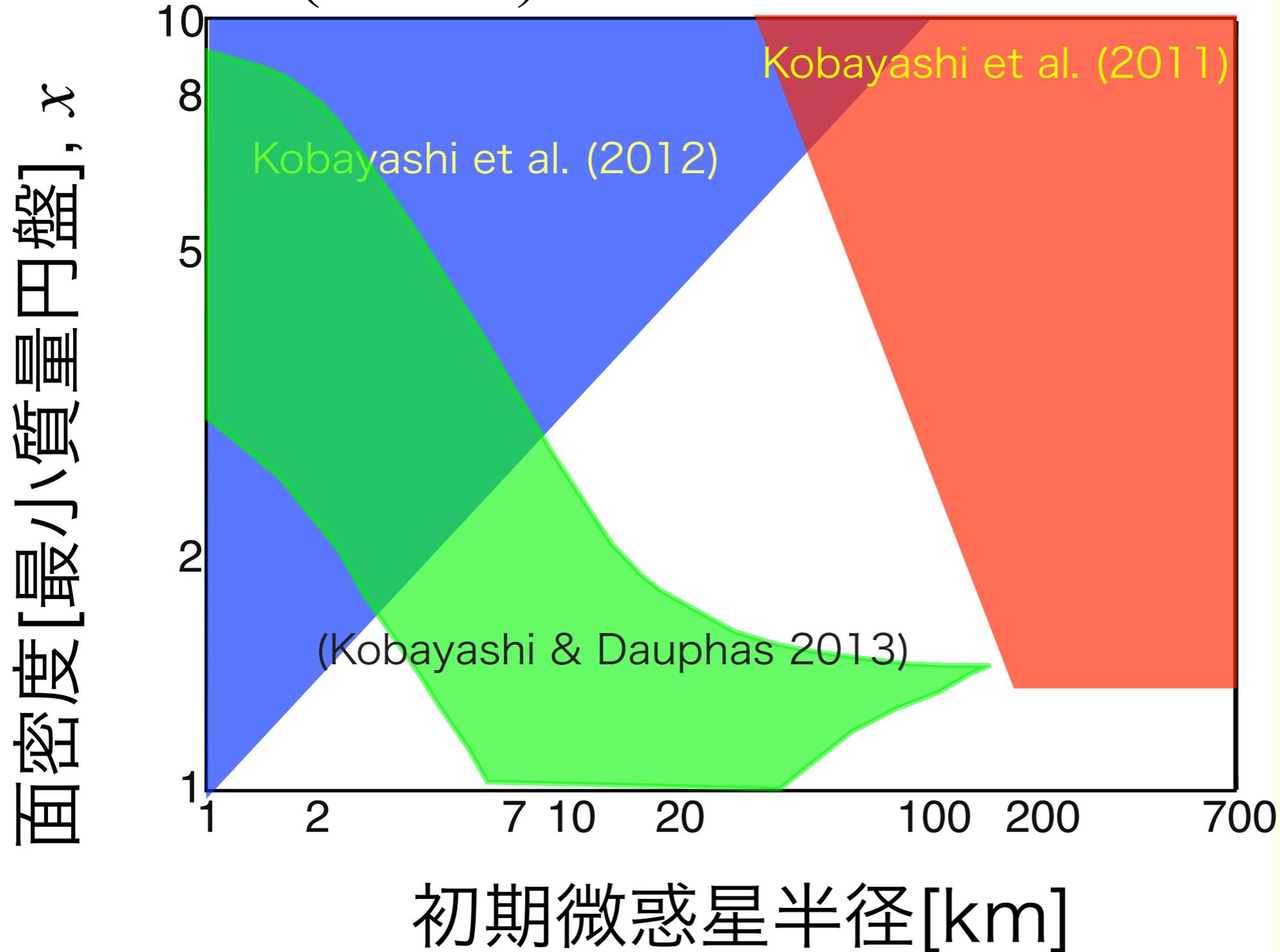
$$\Sigma = x \Sigma_{\text{MMSN}} (a/1 \text{ AU})^{-1.5}$$



- 木星
- 土星
- 急速成長

火星形成条件

$$\Sigma = x \Sigma_{\text{MMSN}} (a/1 \text{ AU})^{-1.5}$$



- 木星
- 土星
- 火星
 - 大きさ
 - 形成時間

太陽系形成条件

- 火星、土星、木星のすべての形成条件は満たす条件はない。
- 氷昇華による汚染を考慮すれば、もう少し条件は緩くなるが一致はしない。
- 円盤の動径方向にゆるい分布にしても条件は合致しない。
- たぶん微惑星は太陽からの距離に応じて大きさが違ったのだろうか。
- 微惑星形成メカニズムが違う？

まとめ

- 木星型惑星を作るには、微惑星形成、固体核形成、ガス降着の3つの主なプロセスがある。
- ダストの合体成長により微惑星形成が可能になった。
- 固体核形成において衝突・破壊が重要で、固体核の成長率や最大質量は微惑星サイズによる。
- 臨界固体核質量は固体核の成長率などによる。
 - ガス降着によってできるギャップも重要。

- Guillot, T., 2005; THE INTERIORS OF GIANT PLANETS: Models and Outstanding Questions, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, vol. 33, p.493-530
- Hori, Y., Ikoma, M., 2010: Critical Core Masses for Gas Giant Formation with Grain-free Envelopes, The Astrophysical Journal, Volume 714, Issue 2, pp. 1343-1346
- Hori, Y., Ikoma, M., 2011: Gas giant formation with small cores triggered by envelope pollution by icy planetesimals, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 416, Issue 2, pp. 1419-1429
- Ida, S., Lin, D. N. C., 2004: Toward a Deterministic Model of Planetary Formation. II. The Formation and Retention of Gas Giant Planets around Stars with a Range of Metallicities, The Astrophysical Journal, Volume 616, Issue 1, pp. 567-572
- Ikoma, M., Nakazawa, K., Emori, H., 2000; Formation of Giant Planets: Dependences on Core Accretion Rate and Grain Opacity, The Astrophysical Journal, Volume 537, Issue 2, pp. 1013-1025
- Kobayashi, H., Tanaka, H., Krivov, A., 2011: Planetary Core Formation with Collisional Fragmentation and Atmosphere to Form Gas Giant Planets, Astrophysical Journal 738, pp. 35-45
- Kobayashi, H., Tanaka, H., Krivov, A., 2011: Planetary Core Formation with Collisional Fragmentation and Atmosphere to Form Gas Giant Planets, Astrophysical Journal 738, pp. 35-45

- Kobayashi, H., Tanaka, H., Krivov, A., 2011: Planetary Core Formation with Collisional Fragmentation and Atmosphere to Form Gas Giant Planets, *Astrophysical Journal* 738, pp. 35-45
- Kobayashi, H., Ormel, C., Ida, S., 2012: Rapid Formation of Saturn after Jupiter Completion, *Astrophysical Journal*, 756, 70
- Kobayashi, H., Dauphas, N., 2013: Small Planetesimals Formed Mars, *Icarus*, in press
- Mizuno, H. 1980; Formation of the Giant Planets, *Progress of Theoretical Physics*, Vol. 64, No. 2, pp. 544-557
- Tanigawa, T., Ikoma, M., 2007: A Systematic Study of the Final Masses of Gas Giant Planets, *The Astrophysical Journal*, Volume 667, Issue 1, pp. 557-570