

「京」で惑星を作る 惑星形成研究の最前線

小南淳子

東京工業大学産学官連携研究員
HPCI戦略プログラム分野5研究員

自己紹介

平成17年3月

東京工業大学理工学研究科地球惑星科学
専攻 博士(理学)

当時から惑星形成に携わってきました。

日本学術振興会特別研究員

国立天文台理論研究部研究員などを経て

現在、東京工業大学地球生命研究所(ELSI)
所属

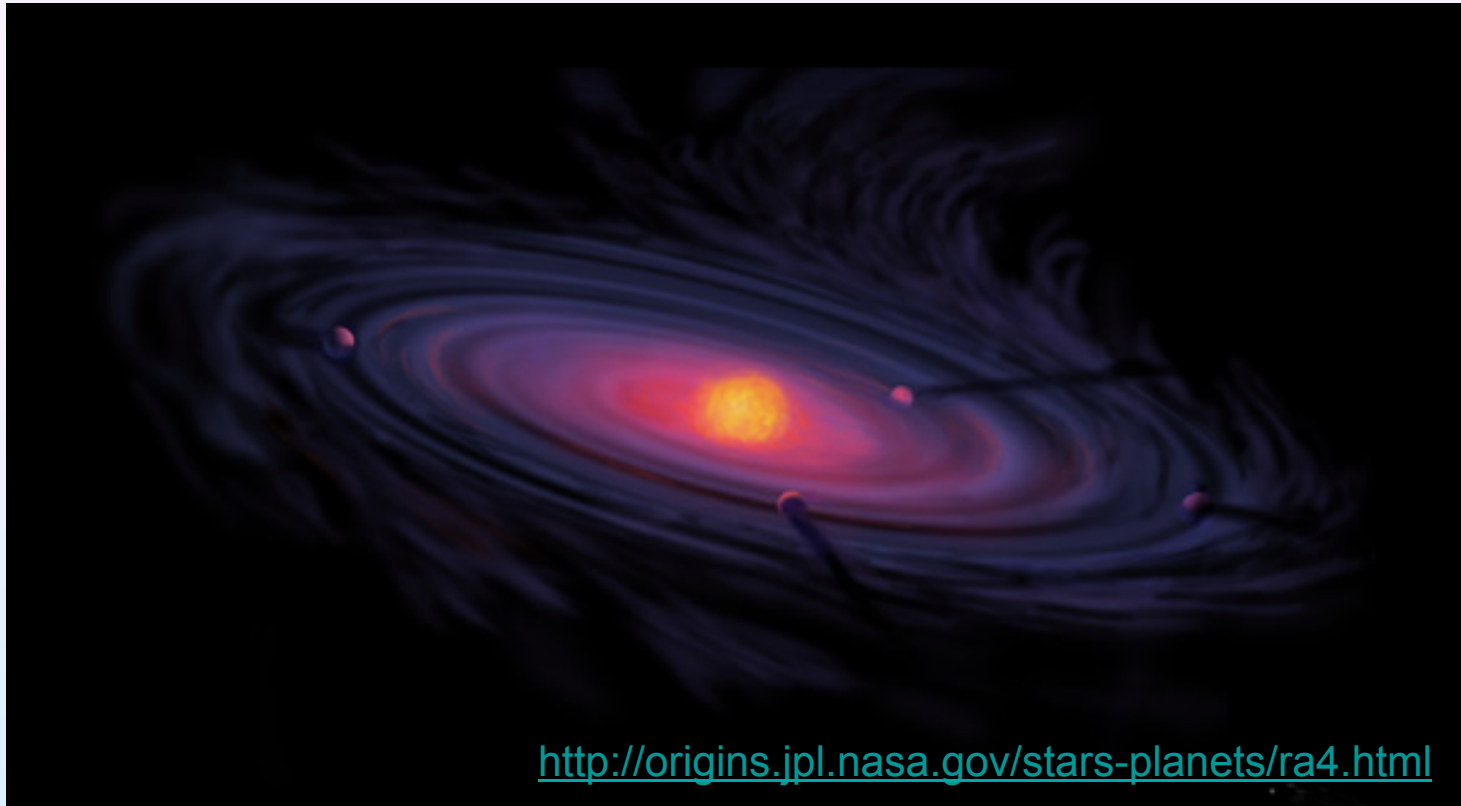
本日の話の流れ

- 太陽系の形成の概略
- 古典的な惑星形成理論
- 惑星形成理論の問題点
- 既存のシミュレーションの問題点と必要なシミュレーション
- 惑星の外側への移動のメカニズム
- 惑星の外側へ移動のシミュレーション結果
- まとめと今後

太陽の形成から惑星形成の場である円盤形成まで

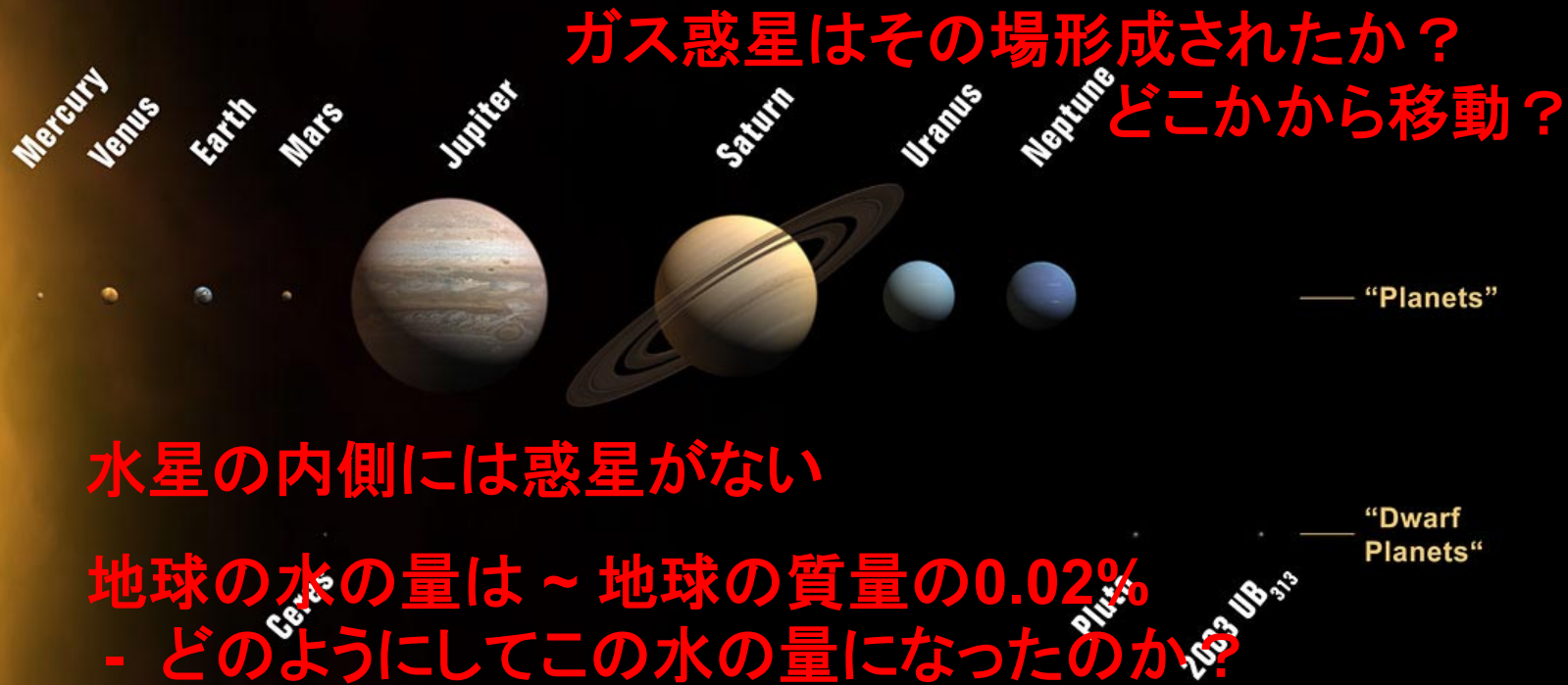
分子雲:ガスとダストからなる
雲状のもの(～数光年～ 10^{13} km) → 重力収縮 → 太陽形成

→ 回転運動により、惑星形成の場の円盤が形成される
この円盤内で惑星がどのように形成されるのかについてお話しします



<http://origins.jpl.nasa.gov/stars-planets/ra4.html>

我々の太陽系



水星の内側には惑星がない

地球の水の量は～地球の質量の0.02%
- どのようにしてこの水の量になったのか？

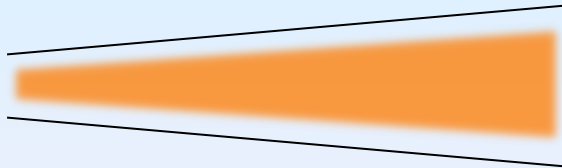
火星の質量が小さいのはなぜ？

http://www.astroarts.co.jp/news/2006/08/28planet_5/

解明されていないこともまだ多くある。
太陽系がどのようにして形成されたのかまだ謎が多い。

「古典的」な惑星形成論
(広く受け入れられている)

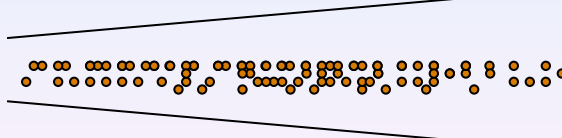
現在広く認められている集積シナリオ



ダストとガスの円盤からダストが濃集して微惑星が形成されると考えられている

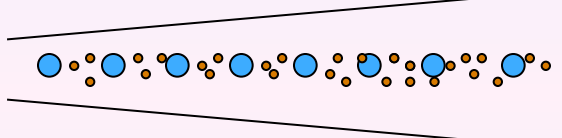
微惑星 (~kmサイズ)

(Greenberg et al. 1978, Wetherill and Stewart 1989, 1993, Kokubo and Ida 1996, Inaba et al. 2001)



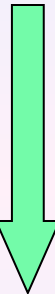
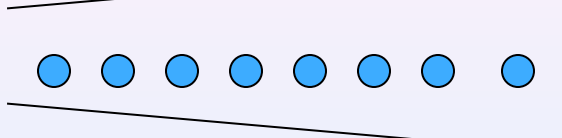
暴走成長

(Makino et al. 1998, Kokubo and Ida 1998)



寡占成長

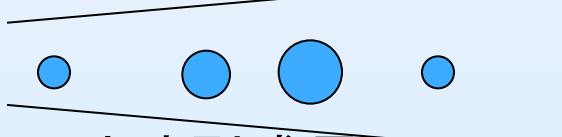
(Weidenschilling et al. 1997, Kokubo and Ida 1998, 2000, 2002)



孤立質量まで成長

原始惑星 (火星サイズ)

(Chambers and Wetherill 1998, Agnor et al. 1999, Iwasaki et al. 2002, Kominami and Ida 2002)



地球型惑星

このシナリオは数千体ほどのN体計算を使い、検証されてきた⁷

N体計算について

太陽の周りに粒子がいくつかまわっているとします

粒子にかかる力

= 太陽からの重力 + **粒子どうしの相互重力**

粒子同士の相互重力は $\frac{1}{\text{粒子間距離の二乗}}$ の計算で、

粒子数が N とすると N^2 回の計算をこなす必要がある

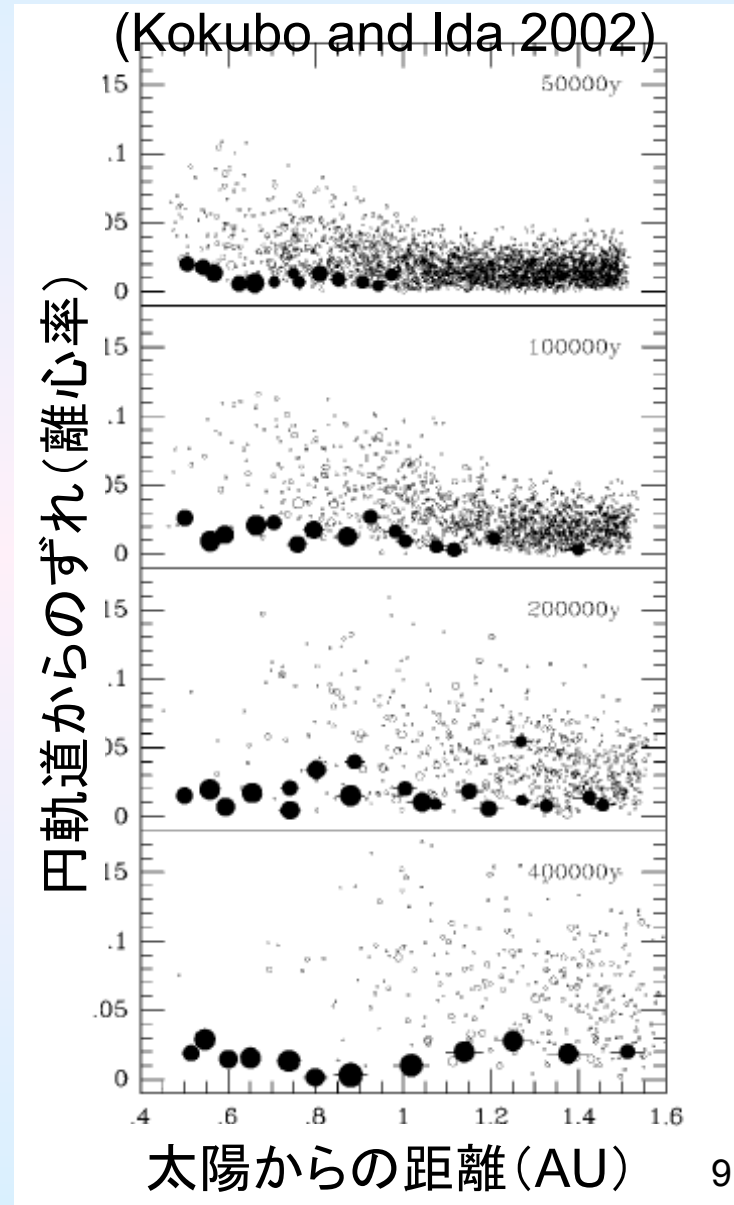
N体計算の例(暴走成長&寡占成長)

内側から集積が進む

大きめのものが暴走的に成長

ほぼ等間隔で原始惑星がラインアップする

この後、巨大衝突時代を迎え、惑星が形成されます



惑星形成理論の大きな問題点

- 外側の惑星はできるまでに時間がかかりすぎる
- 形成途中で惑星が太陽に落ちてしまう

円盤外側で惑星が形成されるまでの時間

例えば天王星付近では、、、

形成時間～100億年

- 形成時間が太陽系の年齢(45億年)より長い
- 円盤ガスの散逸時間(数百万年)より長い

既存の理論では円盤外側では惑星形成に時間がかかりすぎる

円盤内側で惑星を作って
外側に移動させるメカニズムがある可能性？

でも、外側への移動は難しい。。。

惑星形成論の問題：内側への落下問題

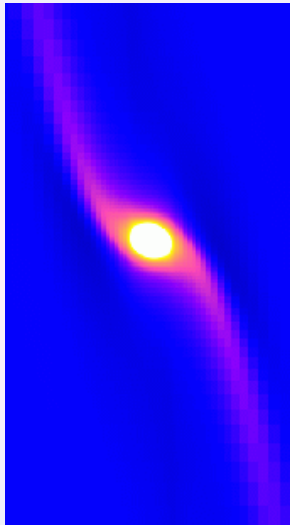
円盤ガスがあることで惑星には2つの効果が働く

(1) ガス抵抗： **内側へ移動**

(Adachi et al. 1976, Tanaka & Ida 1999)

(2) 円盤からの重力相互作用： **内側へ移動**

(e.g. Ward 1986, Tanaka et al. 2002, Tanaka and Ward 2004)



惑星が重力でガス円盤に波をたてる

↓
両側の波からトルクがかかる

↓
角運動量が取られて内側に移動

(Morohoshi and Tanaka 2003)

原始惑星の
「Type-I 移動」

(1) ガス抵抗 → 質量が小さいと効く

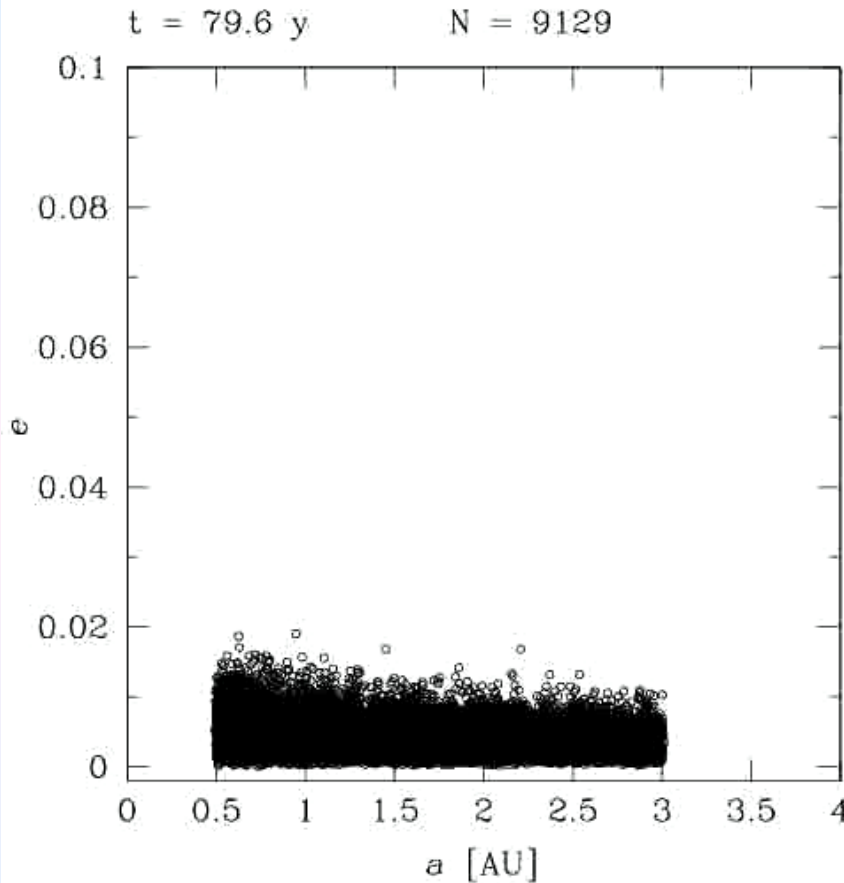
(2) 円盤からの重力相互作用 → 質量が大きいほど効く

月質量以上になると原始惑星はタイプ1移動で中心星に落ちる

ガス抵抗 & タイプ1惑星移動入りの昔の計算

(Kominami & Ida 2005) $m_p = 10^{25} \text{g}$ $n_{\text{init}} \sim 10000$

円軌道からのずれ(離心率)



中心星にどんどん惑星がおちていく。

既存のシミュレーションと必要なシミュレーション



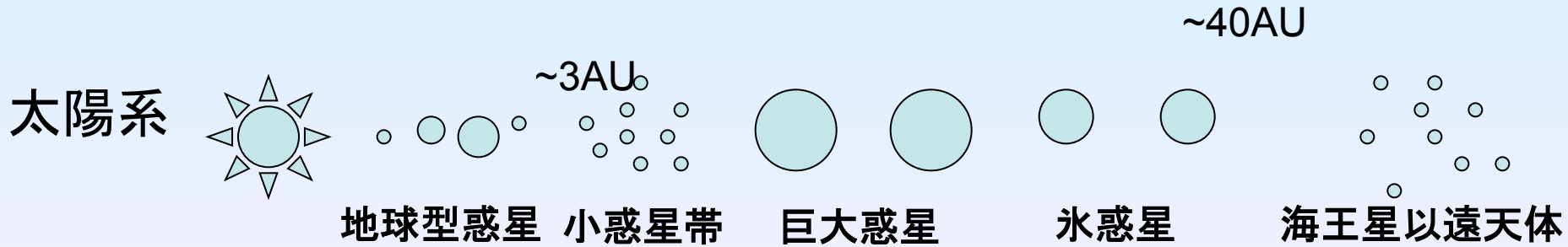
今までのシミュレーション(e.g. Kokubo & Ida 2002)

- 幅の狭いリング状に微惑星を置く ($\Delta a \sim 0.2\text{AU}$)
- 個々の天体の質量が大きく、分解能が低い ($N \sim 10^4$)

必要なシミュレーション

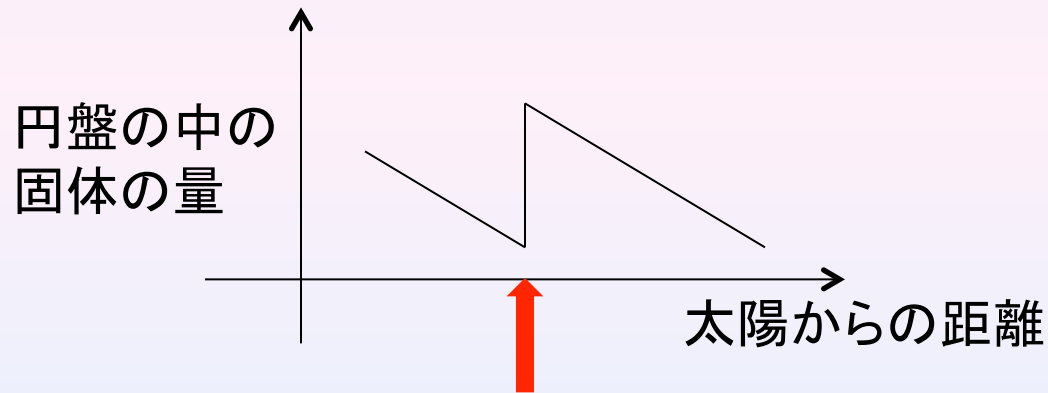
- アイスラインをまたぎ、ガス惑星領域まで含む広い範囲の領域 ($\Delta a \sim 5\text{AU}$)
- 個々の天体の質量が小さく、分解能が高い ($N \sim 10^5$)

アイスライン



水が氷になる領域

現在の太陽系では 2.7 AU くらいにアイスラインがある



アイスライン (2.7AU)

ここ以遠では水分が氷となり固体面密度が不連続に増加

このアイスラインを含めるような広い領域かつ、粒子数の多いN体計算が必要

世界初、惑星集積並列計算コード を開発

N-body code for planet accretion
“Kninja” on K computer

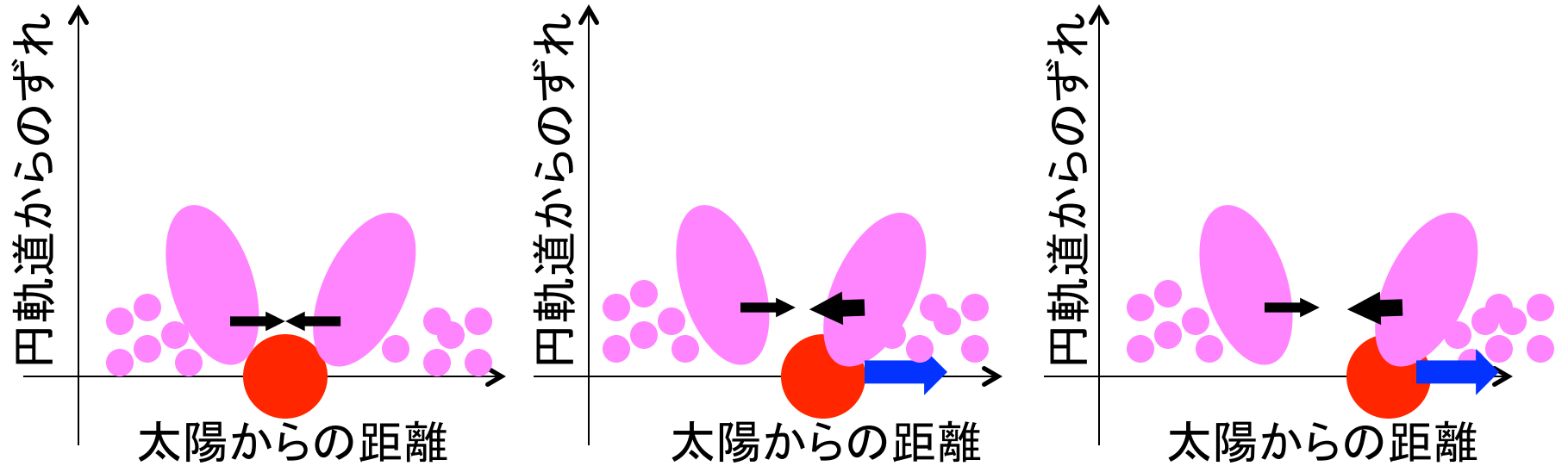
(Kominami, Daisaka, Nitadori & Makino. in prep)

すべての微惑星の自己重力を 考慮した、惑星の外側移動計算 世界で初めて実現

(Kominami, Daisaka, Makino & Fujimoto, 2016)

惑星形成理論の大きな問題を解決する可能性のある
メカニズムを再現できるようになった

微惑星による惑星の外側移動 のメカニズム



原始惑星が微惑星を散乱。
微惑星の分布は対称。

「キック」が与えられて
微惑星の分布が非対称

動いた先でも右側の
微惑星の方が多い。
非対称は続く。

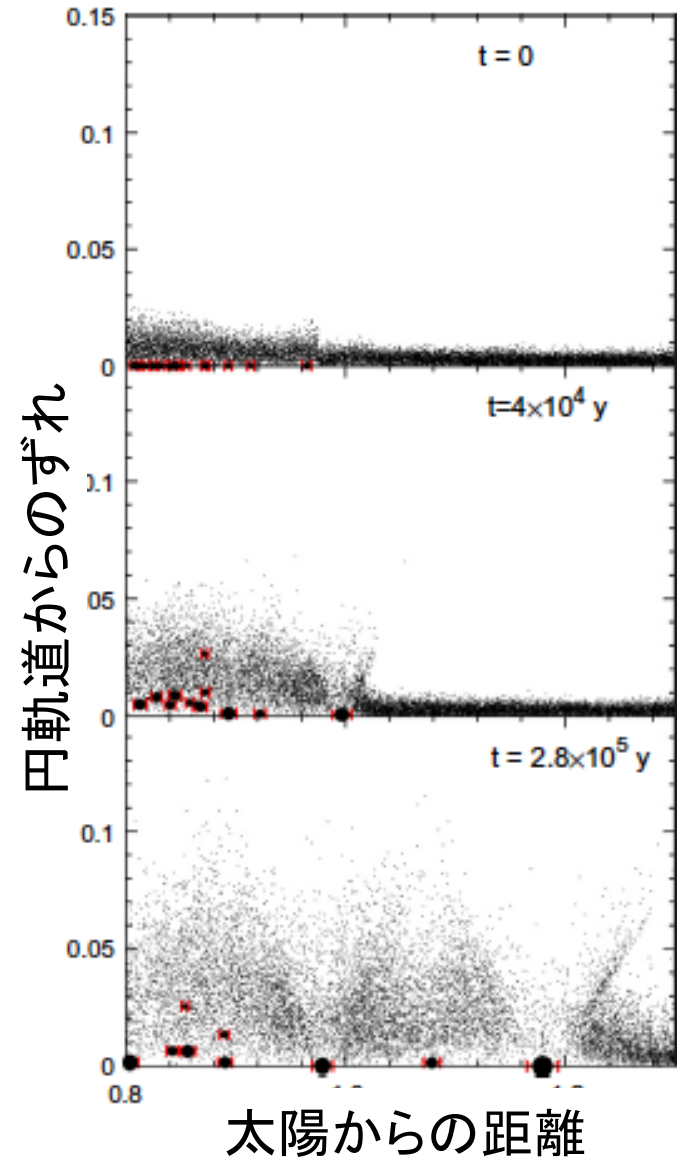
微惑星の非対称な分布ができ、微惑星の多い方から少ない方へ、原始惑星が重力散乱で微惑星をとばし、原始惑星が1方向へ動く。

微惑星どうしの重力を無視した計算は行われている

この計算で見つかった 主要な条件

1. 原始惑星の周りにおける程度
微惑星がないといけない
2. 原始惑星と微惑星の質量比
が ~ 100 以上ないといけない
3. 周囲の微惑星の円軌道から
のずれである離心率が
低くないといけない

微惑星どうしの相互重力も
計算した例はない



微惑星による惑星の外側移動に必要な粒子数

原始惑星を0.1 地球質量とする。

0.7 – 4.0 AUくらいまでを考える。

微惑星質量は 6×10^{24} g以下でないといけない。

→ 粒子数は十万弱必要で、積分時間も十万年くらい必要。

新たに開発したKninja を使うと計算できるようになった

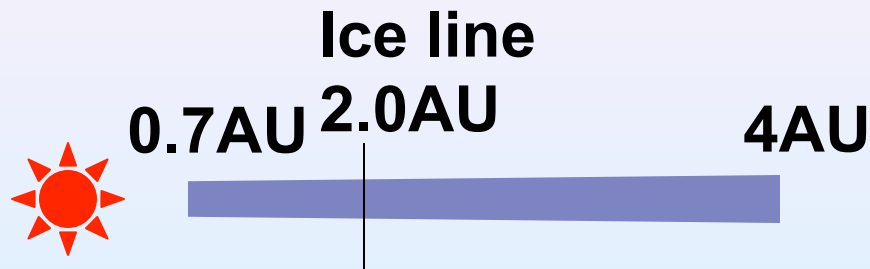
N体計算で
微惑星による惑星の外側への移動
がおこるか計算してみました

計算方法

- Kninja : 惑星集積並列N体計算コード (Kominami et al. in prep)
- 計算機 : スーパーコンピュータ「京」

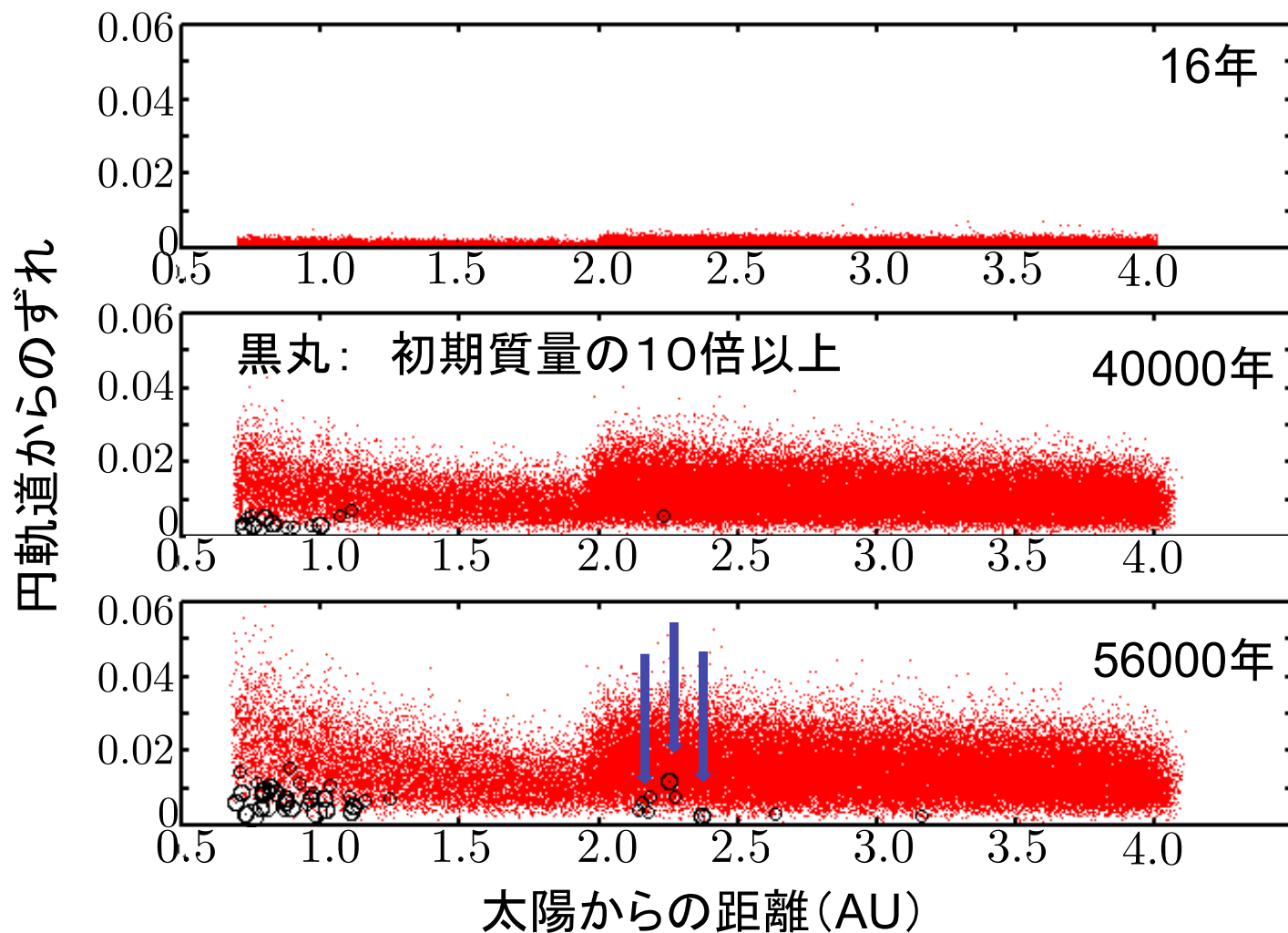
- 使用ノード数1024
- 実行性能は理論ピーク性能の30%
- 計算時間は1週間ほど

Stage 1 : 初期条件



- 微惑星の総数 = 82362 (個々の微惑星質量 10^{24} g)

暴走成長天体がアイスライン以遠にも形成

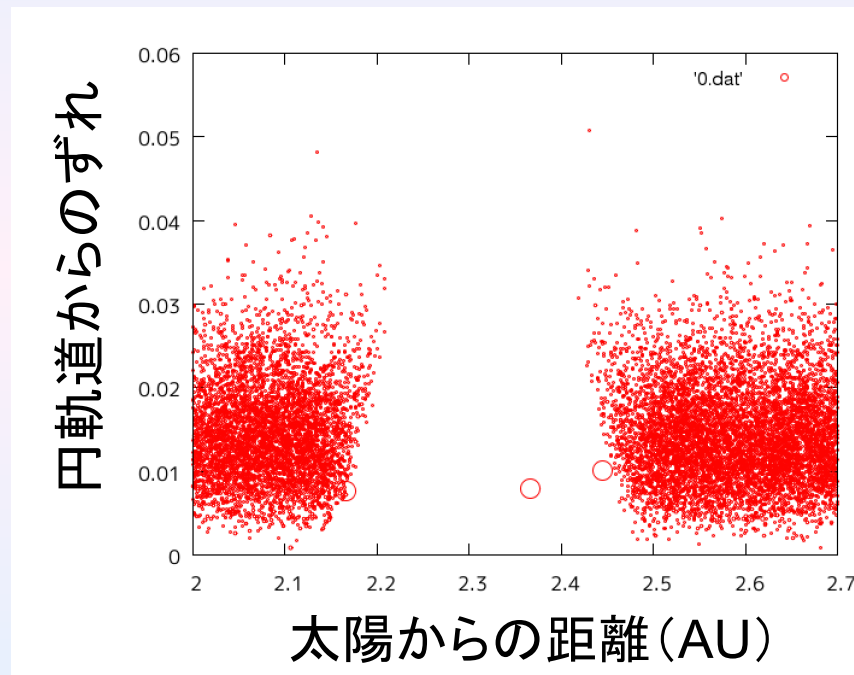


円盤の内縁と、アイスラインのすぐ外側に
暴走成長天体が形成

Stage 2 : 初期条件

アイスラインのすぐ外側の原始惑星

- すぐ近くの微惑星は原始惑星に食べられてしまう
- 徐々にガスをまとっていく

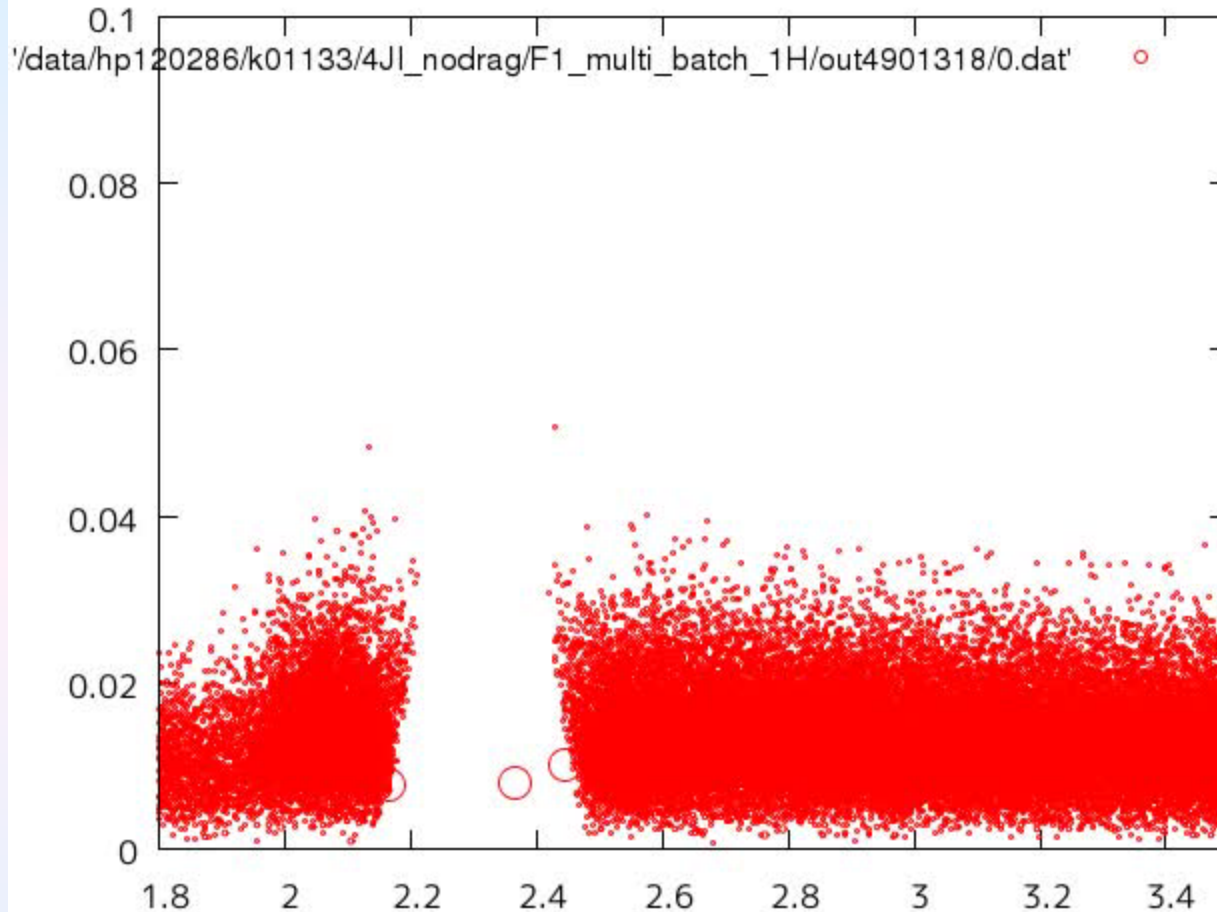


0.1地球質量まで質量をふやし、微惑星円盤にギャップを作る

微惑星どうしの重力相互作用を入れても外側移動はおこるのか検証

惑星移動

円軌道からのずれ



太陽からの距離 (AU)

原始惑星はそのすぐ外側の微惑星をはねとばして外側の
原始惑星は外側に、内側の原始惑星は内側に移動

微惑星の自己重力も入れて惑星の外側移動を実現した計算は初めて 25

ガス円盤の効果を入れる

(1) ガス抵抗: **内側へ移動**

(Adachi et al. 1976, Tanaka & Ida 1999)

(2) 円盤からの重力相互作用、タイプ1惑星移動:

内側へ移動

(e.g. Ward 1986, Tanaka et al. 2002, Tanaka and Ward 2004)

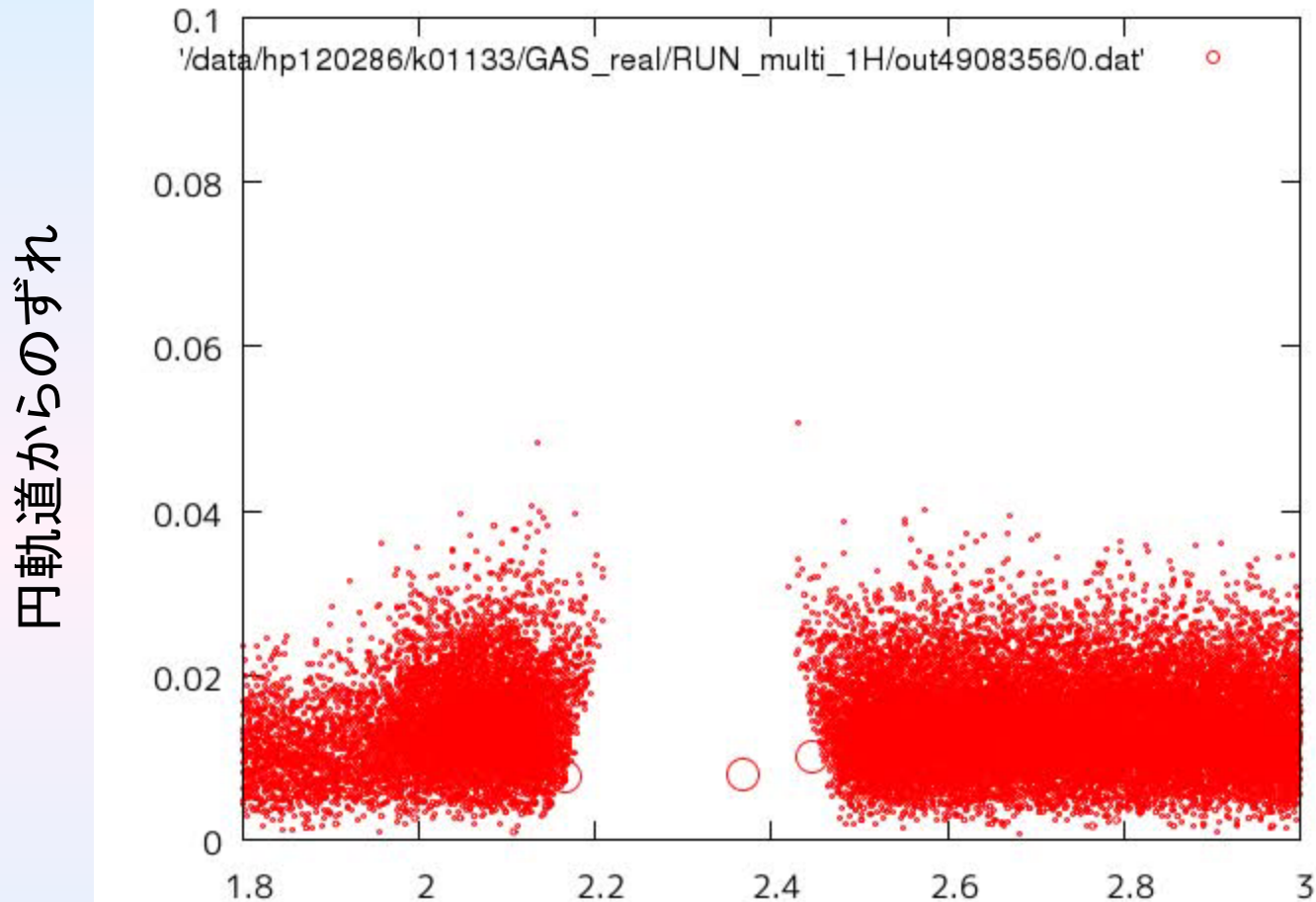
(1) ガス抵抗 → 質量が小さいと効く

(2) 円盤からの重力相互作用 → 質量が大きいほど効く

外側移動のタイムスケールとtype-I migration のタイムスケールは同じくらいなので計算してみないとわからない

惑星落下問題は解決するか？

ガスの効果も含めた場合の時間進化



太陽からの距離 (AU)

3万年くらいは外側に動いている。つまり、タイプ1に勝っている。外側の原始惑星が生き残るかどうか長い計算を行っている途中です。

まとめ

太陽系や系外惑星の形成過程はまだ不明な点が多い

惑星形成論の大きな問題点

- 形成時間問題
- 惑星落下問題

本研究では

- 広い領域の円盤を考慮し、
- 粒子数を増やしシミュレーションの分解能をあげ、
惑星の外側移動をシミュレートした

惑星形成理論の大きな問題を解決できる可能性が出てきた

惑星形成理論の突破口となる可能性あり

今後行うべきこと

十分多い粒子数を考慮すると、従来の形成メカニズムとは描像がずいぶん違ってくる。

完全衝突合体ではなく、衝突したら破片が形成されると思われる。

原始惑星の周りに破片生成:

→破片にはガス抵抗が効きやすい(質量小さいから)

原始惑星の角運動量源となるものが増加:

→原始惑星が外側に動きやすくなる可能性あり

衝突破壊入りのコードは今、だいたいできているのですがテスト計算段階です。

目指すは百万体クラスの計算でガス入り、衝突破壊入りの計算です。次のポスト「京」を使い、より現実的な計算を行い、汎惑星形成理論を構築します。

ここまで