

初期太陽系の同位体不均質性から読み解く微惑星・惑星形成

深井 稜汰、荒川 創太、本間 和明

微惑星形成は、太陽系の惑星形成史を説明する上で非常に重要であり、物質科学的な制約が強く求められる過程である。微惑星を形成したと考えられるダストは、様々な星間環境から供給される。多様な同位体組成を持つダストが完全に混合しなかったために、初期太陽系では円盤スケールでの同位体不均質性が存在した。この同位体不均質性は、微惑星形成時にもある程度保持され、隕石に見られる同位体異常として保存されている。そのため同位体異常は、微惑星形成時の時空間的な指標となり得る。

近年、隕石全岩の高精度同位体比測定による ϵ 値オーダー（1万分の1程度）の同位体不均質性の発見から、隕石は非炭素質隕石（NC）・炭素質隕石（CC）の2つのグループに分類されること（同位体二分性）がわかった[1]。同位体二分性の特徴として、(1) NC・CCグループの不均質性は単一の混合過程では説明できないこと、(2) NC・CCグループ間に組成ギャップが存在することが挙げられる。加えて、NC・CCグループには非常に早期に分化を経験した鉄隕石から、CAI形成の400万年後に集積したコンドライト隕石まで、幅広い年代の母天体を含んでいる[2]。NC・CCリザーバーはこの期間、円盤上で空間的に分離されていたと解釈されている。

これまでの研究から、様々な元素において同位体不均質性をつくった担体や、その混合のスケールが導かれ、同位体システムティクスが構築されてきた。各元素のシステムティクスに見られた特徴から、おおむね以下のような結論が得られている：(1) NC・CCリザーバーの不均質性はAGB星、超新星爆発等に由来する多成分の混合で説明可能である。(2) CCリザーバーはNCリザーバーより不均質性が高い。現状、分析上の問題点がいくつか指摘されており、元素ごとに整合的な結果が得られてはいないことに注意したい。

隕石の同位体不均質性の結果から、微惑星・惑星形成過程に対する様々な問いが生まれている。一つの問いは、CCグループは同位体的に不均質であり、鉱物学的にも多様な組み合わせの試料が発見されているが、現在の惑星や小惑星帯を作ったとされるC型小惑星の多くが、CCグループの端成分なのか、平均成分なのか、隕石学から結論は得られていない。NCリザーバーにおいては、地球と完全に一致する同位体組成の隕石が得られておらず、地球の主成分となった微惑星が明らかではない。こうした疑問を解決するためには、将来探査による小惑星サンプルリターンが主軸となりながら、装置の性能向上を含む隕石学の発展、地上観測・衛星観測などによる小惑星分光観測の発展、様々な制約を取り入れた理論研究が必要となる。

[1] Warren (2011) *EPSL*, **311**, 93. [2] Kruijer et al. (2017) *PNAS*, **114**, 6712.

22/02/08 惑星圏研究会 (Invited)

初期太陽系の同位体不均質性から読み解く 微惑星・惑星形成

深井 稜汰¹, 荒川 創太², 本間 和明³
¹宇宙科学研究所, ²国立天文台, ³東京工業大学

協力・謝辞: 横山 哲也 (東工大), 奥住 聡 (東工大), 平田 岳史 (東京大), 山口 弘悦 (宇宙研),
 小惑星スプリンターメンバー, 白井 寛裕 研究室・地球外物質研究グループ (宇宙研)

1

イントロ: 微惑星・惑星の創造 02/20

ISASの小天体探査戦略

Focus of the Symposium 2022

一連のミッションで、これらの問題を探索する

2

イントロ: 微惑星・惑星の創造 03/20

小惑星の分布

46億年前 -44億年前 -35億年前 現在

太陽・惑星の活動 生命の活動

太陽系初級物質 微惑星形成 惑星形成
 円盤の形成 惑星形成 小天体による物質輸送

S型: 石質の未分化な小天体
 → 固体惑星の原材料?
C型: 炭素質の未分化な小天体
 → 揮発性物質の輸送源?

**隕石学・宇宙化学
 によって実証的に制約**

3

イントロ: 地球外物質研究・隕石学 04/20

地球外物質

リターンサンプル (小惑星・彗星・月)・惑星間塵・隕石

CC (Carbonaceous chondrites)
 ⇒ C型小惑星 など
 サブグループ (CI, CM, CVなど)
 + アングループ (Tagish Lakeなど)

NC (Non-carbonaceous meteorites)
 ⇒ S型小惑星 など
 普通コンドライト
 エンスタタイトコンドライト
 エコンドライト (ユークライトなど)

4

イントロ: 本講演のテーマ 05/20

- ① 円盤の物理化学過程と同位体不均質性
- ② **CC**の同位体不均質性と測るべきターゲット
- ③ **NC**の同位体不均質性と測るべきターゲット
- ④ 「組成」を考慮した惑星形成モデル

5

手法: 全岩試料の同位体比測定 06/20

粉末・均質化 → 酸分解 → 化学分離 → 質量分析 (同位体比測定)

TIMS @ Tokyo Tech

質量分析 (同位体比測定)

質量分離 (磁場型)
 50Cr^+ 52Cr^+ 53Cr^+ 54Cr^+

マルチコレクターのイオン検出器

同位体組成の表記

^{54}Cr , ^{52}Cr の原子の個数比

$$\left(\frac{^{54}\text{Cr}}{^{52}\text{Cr}}\right)_{\text{meteorites}}$$

$^{54}\text{Cr}/^{52}\text{Cr}$ 比の偏差

$$\mu^{54}\text{Cr} = \left(\frac{\left(\frac{^{54}\text{Cr}}{^{52}\text{Cr}}\right)_{\text{meteorites}}}{\left(\frac{^{54}\text{Cr}}{^{52}\text{Cr}}\right)_{\text{terrestrial}}} - 1\right) \times 10^5$$

6

① 円盤の物理化学過程：同位体の起源 [07/20]

元素合成環境→観測研究がリード
X線観測: 山口准教授グループ (ISAS)

複数の元素合成環境で同位体が合成 (例: 低質量星・超新星爆発)
→ 恒星で出来た粒子が円盤に不均質分布

7

① 円盤の物理化学過程：同位体不均質の成因モデル [08/20]

① 不均質な分子雲コアからの降着 ② 初期円盤へ超新星爆発の注入

隕石学のみから同位体不均質の成因モデルを制約するのは困難
→ 天文学から太陽系周辺環境の制約が必要

8

① 円盤の物理化学過程：初期太陽系の同位体均質化モデル [09/20]

外部天体からの粒子注入
原始太陽系円盤での過程
微惑星形成

円盤の均質化モデル

微惑星 ⇔ 隕石全岩

円盤内の移流・拡散によって同位体組成は均質化する

9

① 円盤の物理化学過程：同位体二分性の発見とモデル [10/20]

同位体二分性とは

① NC・CC不均質が単一の混合過程で説明できない
② NC・CC間に組成ギャップが存在

理論: 奥住准教授グループ (東工大)
同位体二分性モデルの提唱

→ 時空間的なリザーバーの分離
成因の候補:
・ 巨大惑星のガスギャップ
・ スノーラインでの微惑星形成

イメージ
Sun 軌道長半径 CC型 S-type C-type

10

② CC (炭素質隕石) : CC隕石の組成 [11/20]

これまでの研究 (NC & CC共通)
同位体システマティクスの構築 (担体粒子の特定・不均質のスケール)

これまでの発見

- 不均質の要因:
NC物質-超新星物質等の混合 (CC lineの形成)
低質量星物質-太陽系物質(?)の混合 (CC line上)
- 不均質のスケール:
NCより不均質性が高い (100-500 ppm程度)

11

② CC (炭素質隕石) : CC隕石の組成 [12/20]

現状の課題

- 酸分解法の確度が不十分/母天体変成の影響の理解が不十分
- 担体粒子の理解が不十分 (Moのrプロセス担体粒子は不明)

酸分解法開発: 横山教授グループ (東工大)
プレソーラー粒子測定: 平田教授グループ (東大)

Fukui et al. in prep.

12

② CC (炭素質隕石) : 応用研究 (微惑星形成領域の推定) 13/20

Cr: CC内の不均質性は、空間的な粒子の分布を反映
 → CCの微惑星形成領域の推定

$\rho_{inj} = 3 \times 10^{-13} \text{ g cm}^{-3}, \alpha = 10^{-4}, a_{inj} = 10^{-3} \text{ cm}$

Fukai and Anakawa (2021) ApJ
 Tsuchiyama et al. (2021) Science Adv.

13

② CC (炭素質隕石) : 測るべきターゲット 14/20

★ 惑星&小惑星帯形成の主成分の一つ"C-type" → どのCC?

Raymond and Neesvorny (2020)

- ・ 隕石学的アプローチでC-typeの組成バリエーションを追跡
- ・ 小惑星観測研究の発展・連携が必須 黒川さん・黄さん・紅山さん他 金丸さん (宇宙研)
- ・ 測るべきターゲット → アングループのCCや軌道が判明しているCC
 サンプルリターンは彗星? (二分性の先へ)
- ・ 非サンプルリターンの探査は 普遍的なCC 探し が重要か?

14

③ NC (非炭素質隕石) : NC隕石の組成 15/20

これまでの発見

- ・ 不均質の原因:
 低質量星物質-太陽系物質(?)の混合 (NC line上)
- ・ 不均質のスケール:
 CCより不均質性が低い (10-100 ppm程度)

黒川・深井・本間 (2022) 遊星人

15

③ NC (非炭素質隕石) : NC隕石の組成 16/20

現状の課題

NCのエンドメンバーが不明 → 宇宙線照射の影響が検討され始めた

Tremper et al. (2009) Science
 Kadlag et al. (2021) MNRAS

16

③ NC (非炭素質隕石) : 応用研究 (固体惑星の主材料) 17/20

固体惑星の主材料

地球岩石と同位体比が完全一致するNCはない

Fukai and Yokoyama (2019) ApJ
 Yokoyama, Nagai, Fukai, Hinata (2019) ApJ

17

③ NC (非炭素質隕石) : 測るべきターゲット 18/20

★ 固体惑星の主材料&NCの端成分はなに?

Daughes et al. (2014)

遷元的なNCに着目

- ・ エンスタタイトコンドライト (EH, EL)
- ・ IAB鉄隕石
- ・ オープライト

落下隕石非常に少ない
 E型小惑星はサンプルリターン候補

Hyodo et al. (2017) Arizona-JAXA Work shop /にて発表

18

最終目標：惑星形成モデルの検討 19/20

「組成」を考慮した惑星形成モデル
 コンドライトの混合で固体惑星をつくる試み
 → 隕石データが増えるたびモデルが変わっている

今後は...

- (理論) 微惑星形成・輸送メカニズム ×
- (探査) 未知天体サンプルリターン ×
- (観測) C型小惑星等の観測データ拡大 ×
- (分析) サンプルの拡大・データベース構築

The diagram illustrates the physical and chemical processes of planetary formation. It is divided into four main stages: 1. Dust coagulation (ダストの凝集過程), 2. Planetesimal formation (小惑星の形成過程), 3. Planetesimal migration (小惑星の輸送過程), and 4. Planetesimal distribution (小惑星の分布). The diagram shows the flow from dust to planetesimals, their migration towards the inner solar system, and their final distribution in different regions like NEA, Trojans, and TNOs. It also mentions the input of primitive materials and the study of Earth materials, S-type asteroids, and C/D-type asteroids.

19

まとめ

- NC, CCにおける不均質の要因・スケールはわかってきた
- 一部の分析とデータ解釈に課題有り
- アングラープの隕石等のデータ拡張 (リュグウウ含む) + 彗星・E型小惑星などのサンプルリターン検討 (探査対象は**「端成分」「始原物質」**)
- 理論・探査・観測・分析による
 「組成」を考慮した惑星形成モデルの構築が必要

20