

Oct 6, 2025, CPS seminar

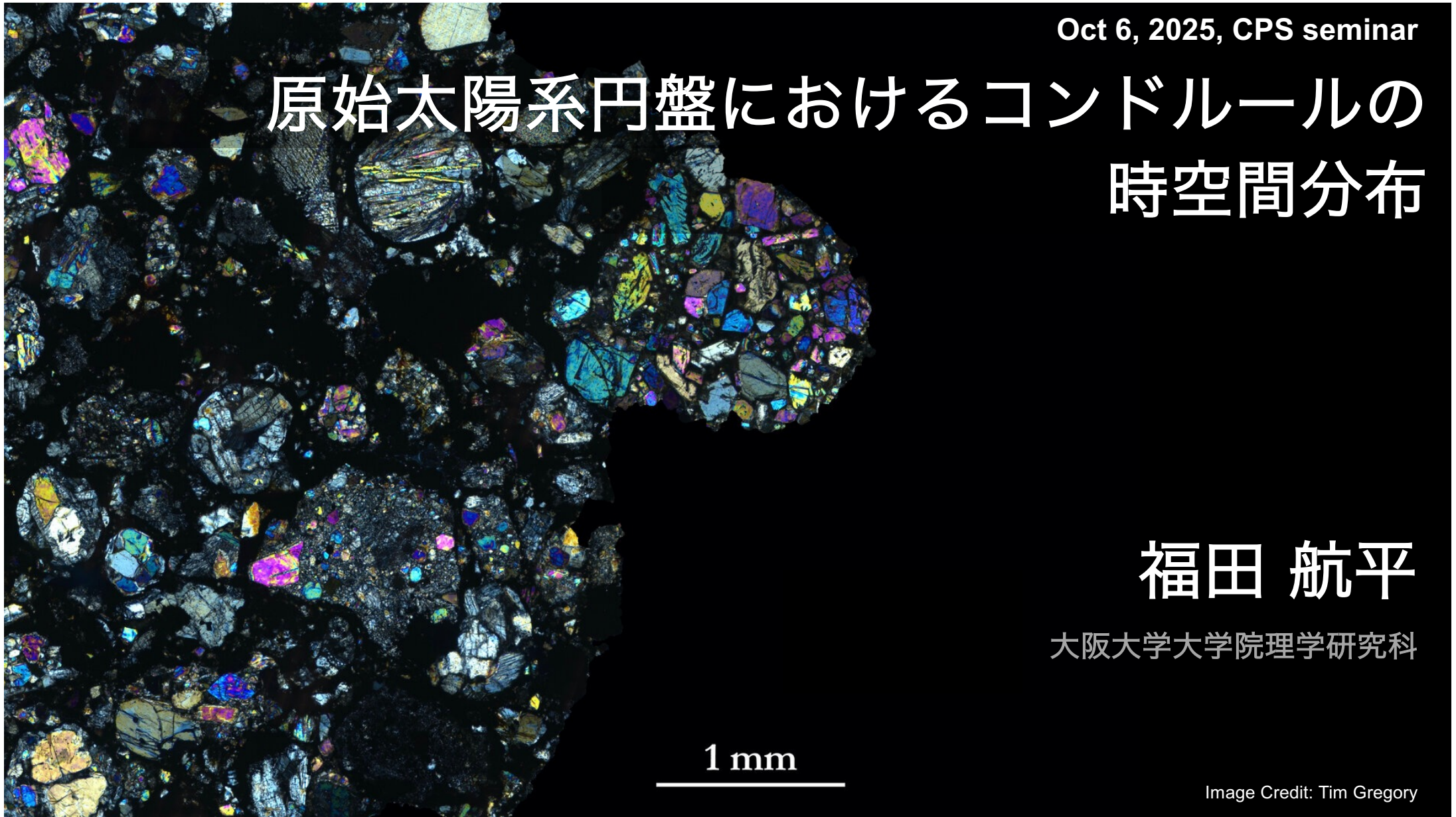
原始太陽系円盤におけるコンドロールの 時空間分布

福田 航平

大阪大学大学院理学研究科

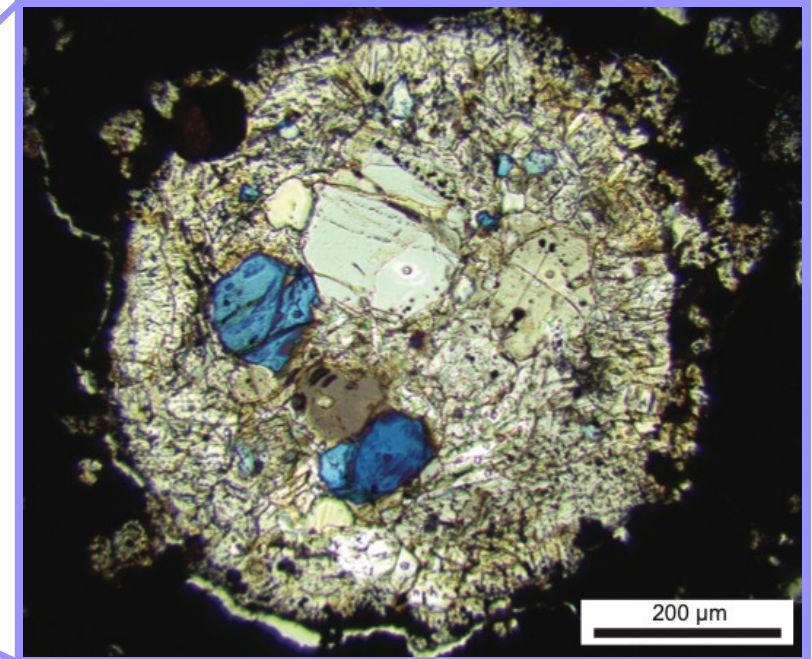
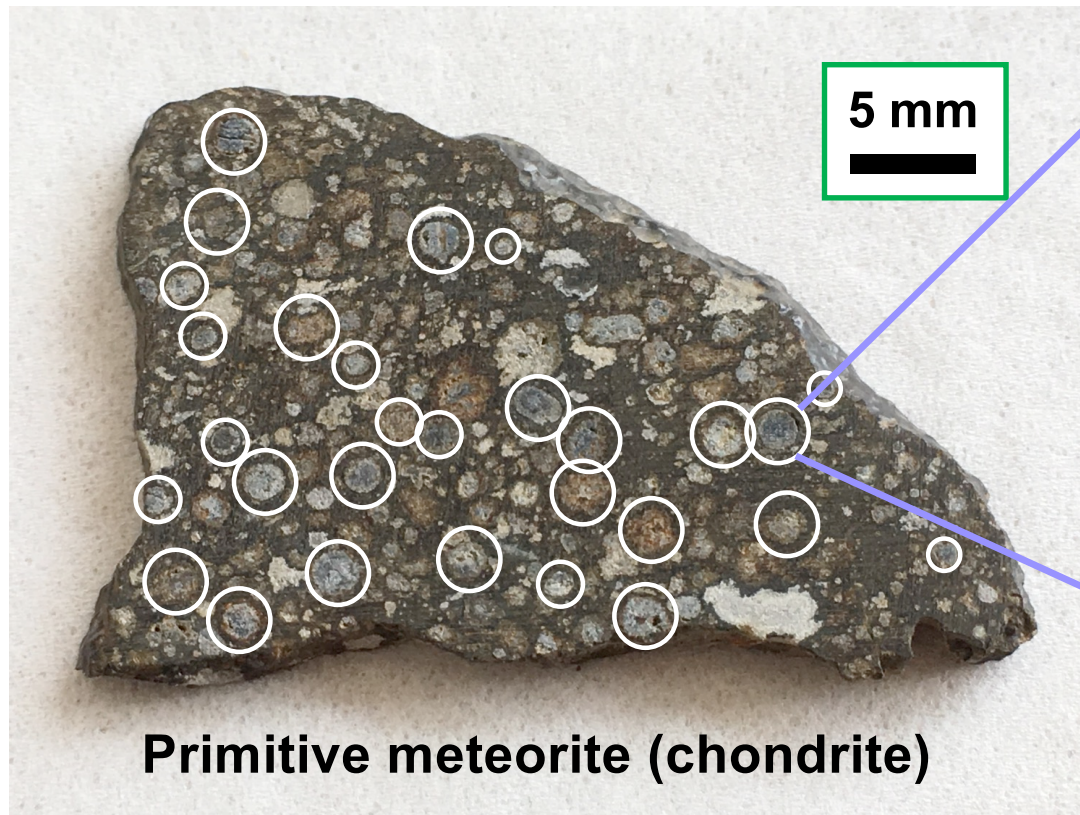
1 mm

Image Credit: Tim Gregory



コンドルール: 微惑星の種

1/23



- サブmmのケイ酸塩球粒
- 前駆ダストの急加熱・急冷により形成

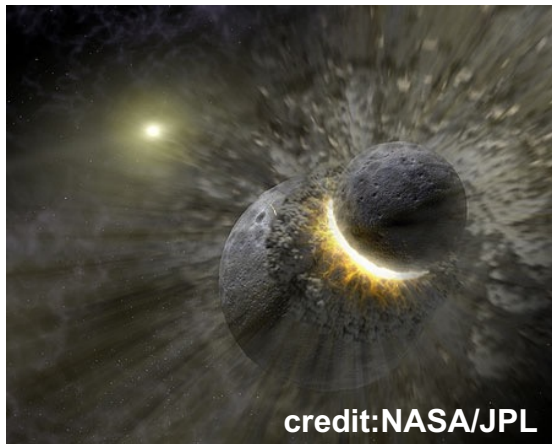
微惑星形成以前の原始太陽系円盤環境を記録する物質

コンドルール形成モデル

2/23

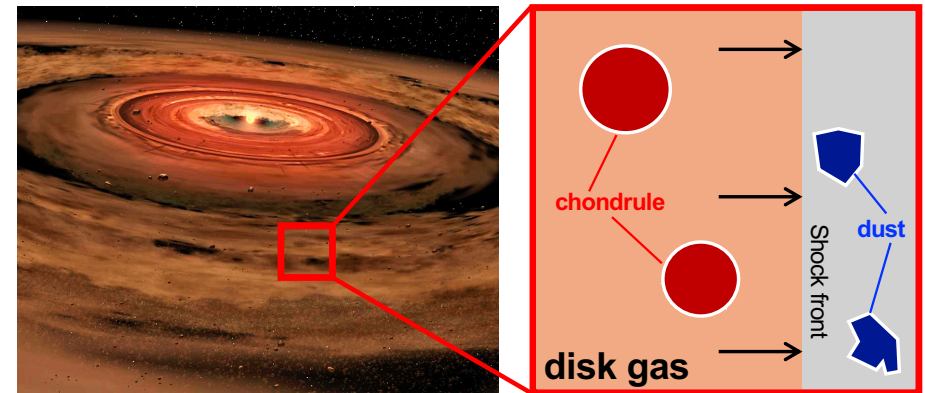
微惑星の衝突

e.g., Johnson+(2015) *Nature*



衝撃波加熱

e.g., Desch+(2012) *MAPS*



衝撃波の起源

- 重量不安定
- 微惑星によるバウショック

雷加熱

e.g., Kaneko+(2023) *ApJ*

コンドールの時空間分布を明らかにできれば、
巨大惑星形成時期や微惑星の分布、ダスト密度分布の理解に繋がる

Outline

1. コンドルールの形成領域: 安定同位体比からの示唆
2. コンドルールの形成年代: Al-Mg年代からの制約
3. コンドルール形成と母天体集積の関連

同位体比の変動要因

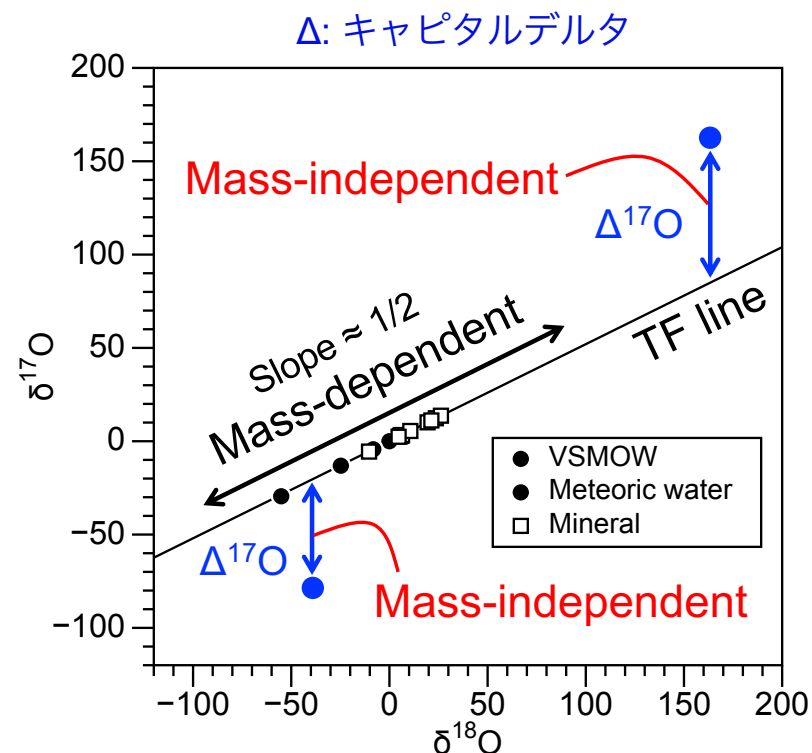
3/23

□ 質量依存同位体分別

- 動的同位体分別: 非可逆反応 (蒸発、凝縮)
- 平衡同位体分別: 可逆反応 (化学平衡)

□ 非質量依存同位体変動

- 光化学反応 $\Delta^{17}\text{O} (= \delta^{17}\text{O} - 0.52 \times \delta^{18}\text{O})$
- 核合成起源同位体異常 e.g., $\epsilon^{50}\text{Ti}$, $\epsilon^{54}\text{Cr}$
- 放射壊変 $\delta^{26}\text{Mg}^* ({}^{26}\text{Al} \rightarrow {}^{26}\text{Mg} + e^+ + \nu_e)$
- 宇宙線との相互作用 (核破碎、中性子捕獲)

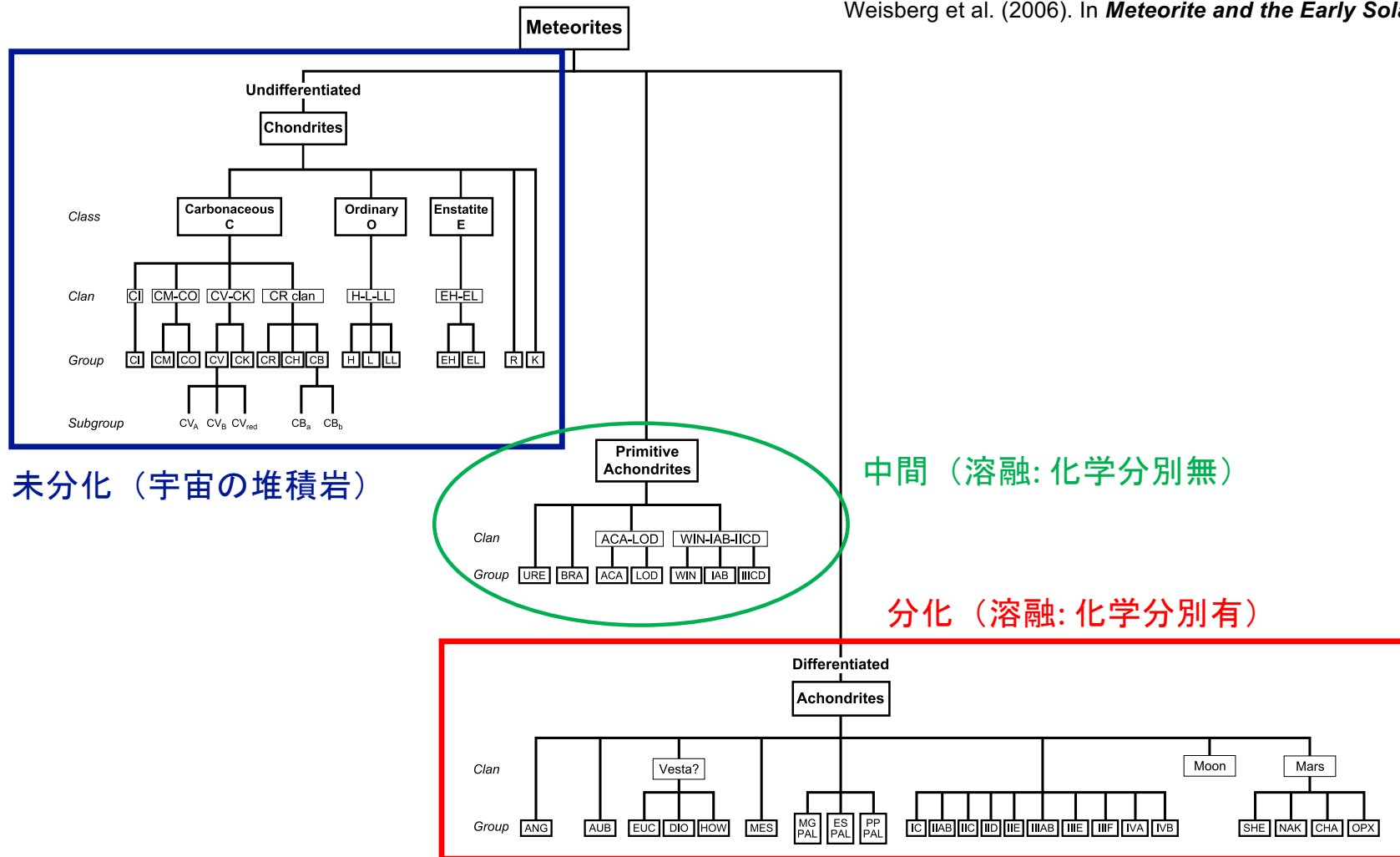


地球物質の三酸素同位体図

隕石の分類

4/23

Weisberg et al. (2006). In *Meteorite and the Early Solar System II*



未分化（宇宙の堆積岩）

中間（溶融: 化学分別無）

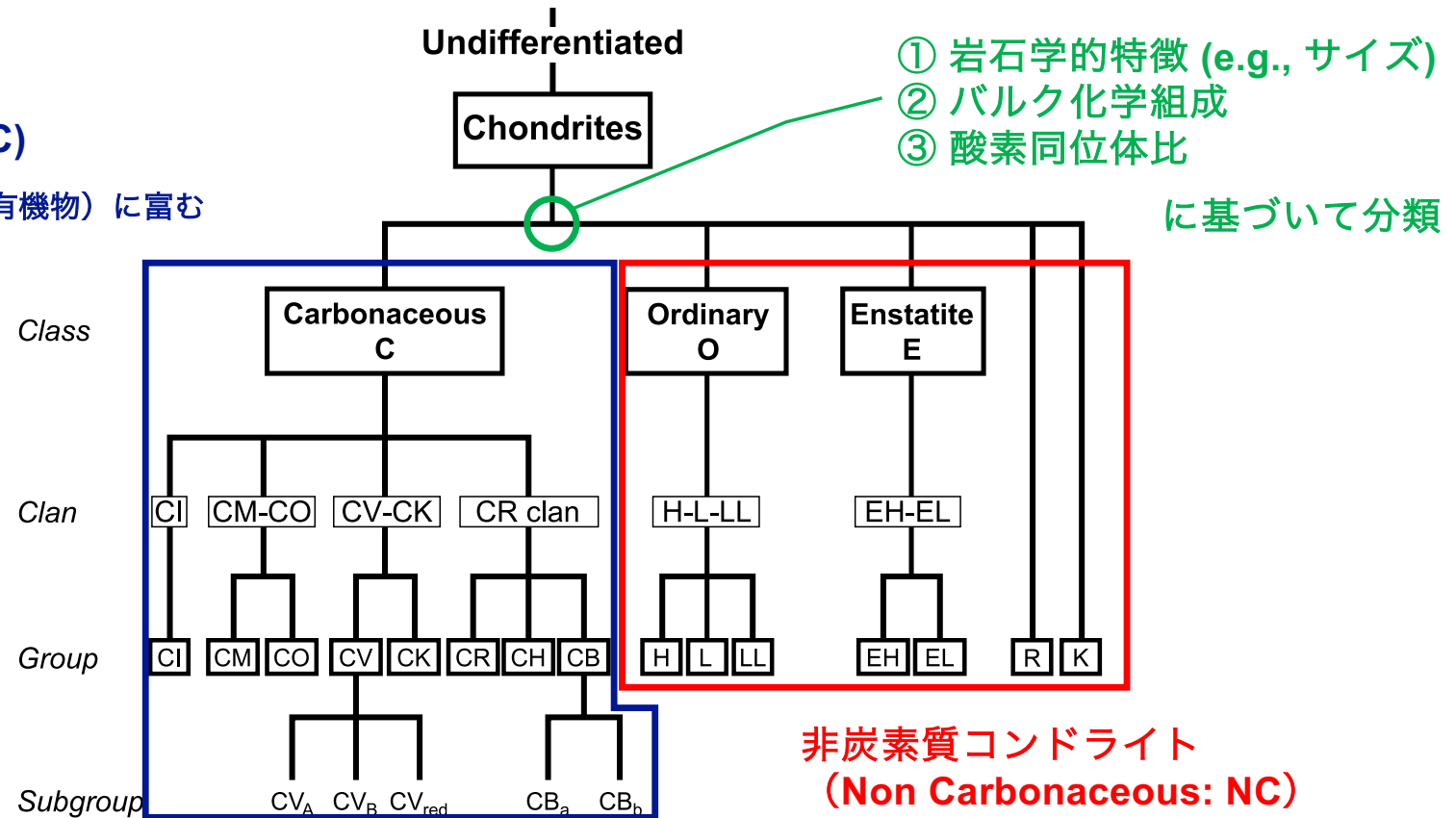
分化（溶融: 化学分別有）

コンドライトの分類

5/23

炭素質コンドライト (Carbonaceous : CC)

- ・ 揮発性物質（水・有機物）に富む
- ・ 水質変成の痕跡



非炭素質コンドライト (Non Carbonaceous: NC)

- ・ 熱変成度に大きなバリエーション

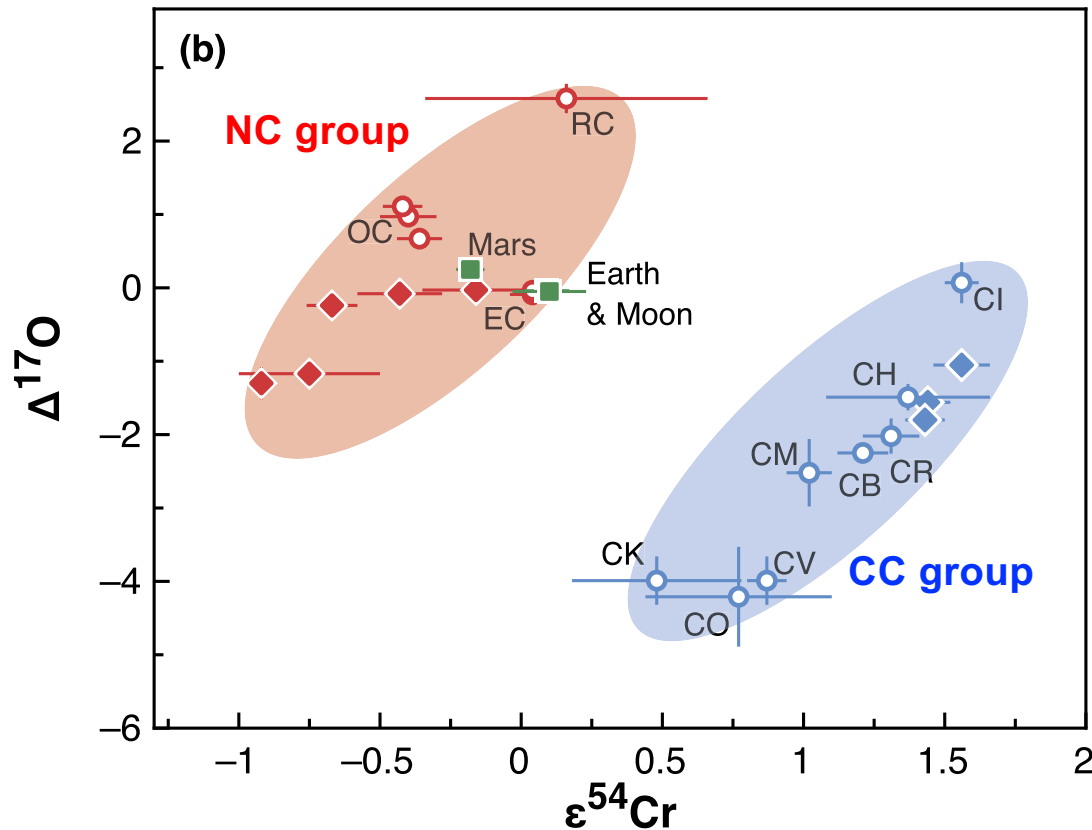
Outline

1. コンドルールの形成領域: 安定同位体比からの示唆
2. コンドルールの形成年代: Al-Mg年代からの制約
3. コンドルール形成と母天体集積の関連

隕石全岩の同位体異常 (同位体二分性)

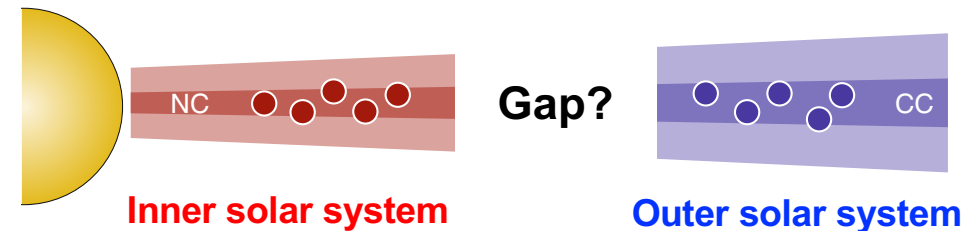
6/23

Kleine+(2020) *Space Sci. Rev.*



NC: Non-Carbonaceous

CC: Carbonaceous

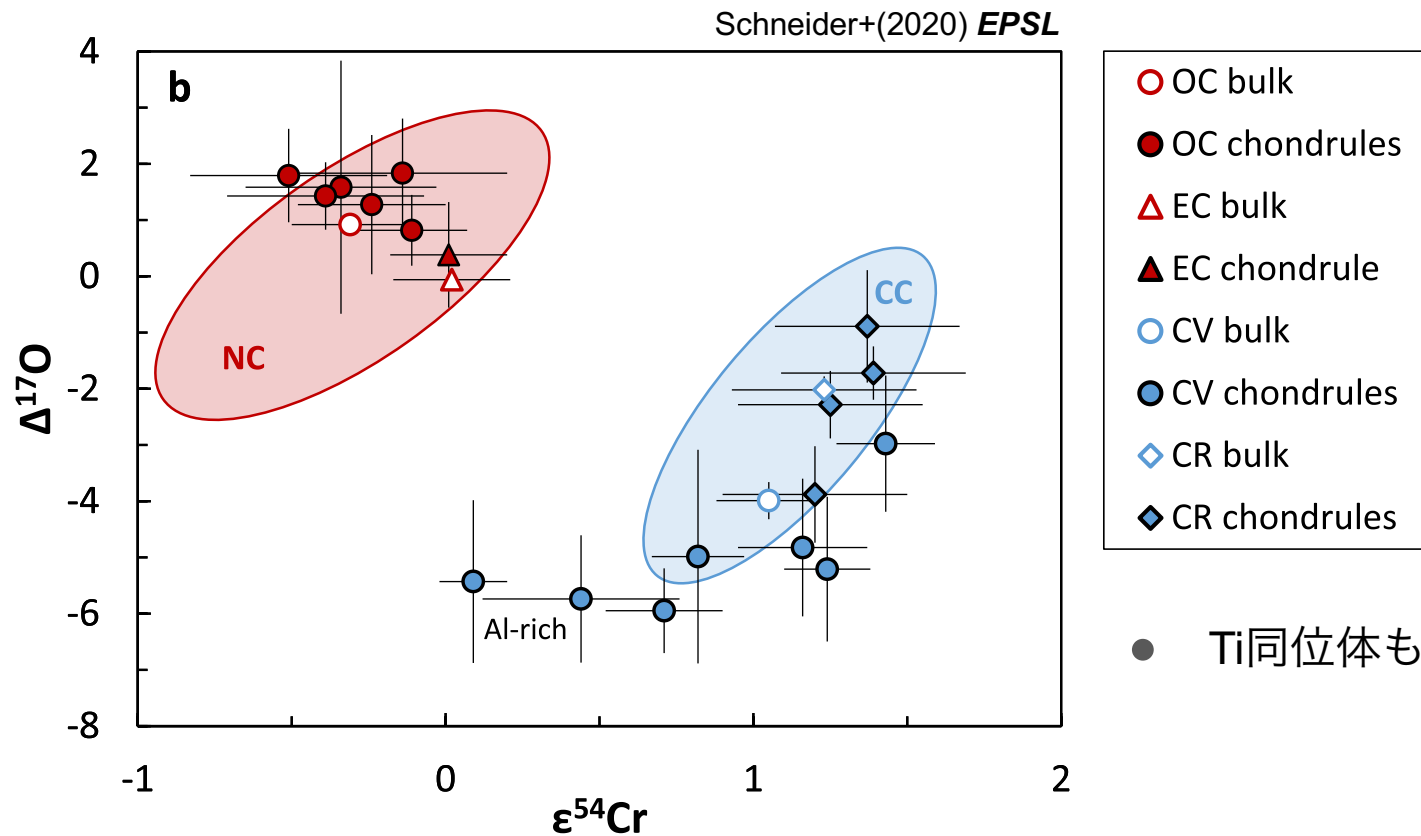


Modified after Kruijer+(2020) *Nat.Astron*

NCグループは内側太陽系、CCグループは外側太陽系で形成

コンドロールの同位体異常

7/23



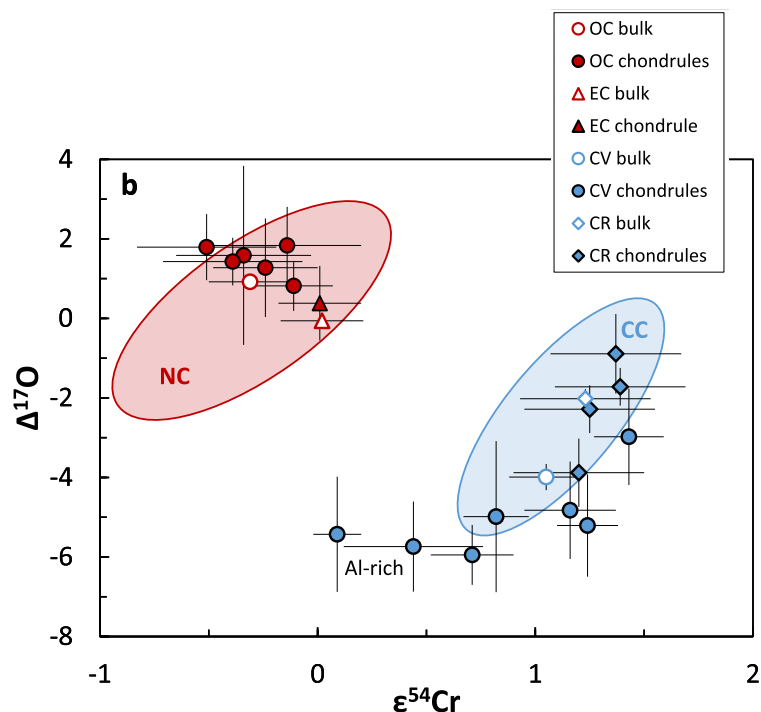
Gerber+(2017) *ApJL*

NCグループとCCグループ間で異なる同位体組成を示す

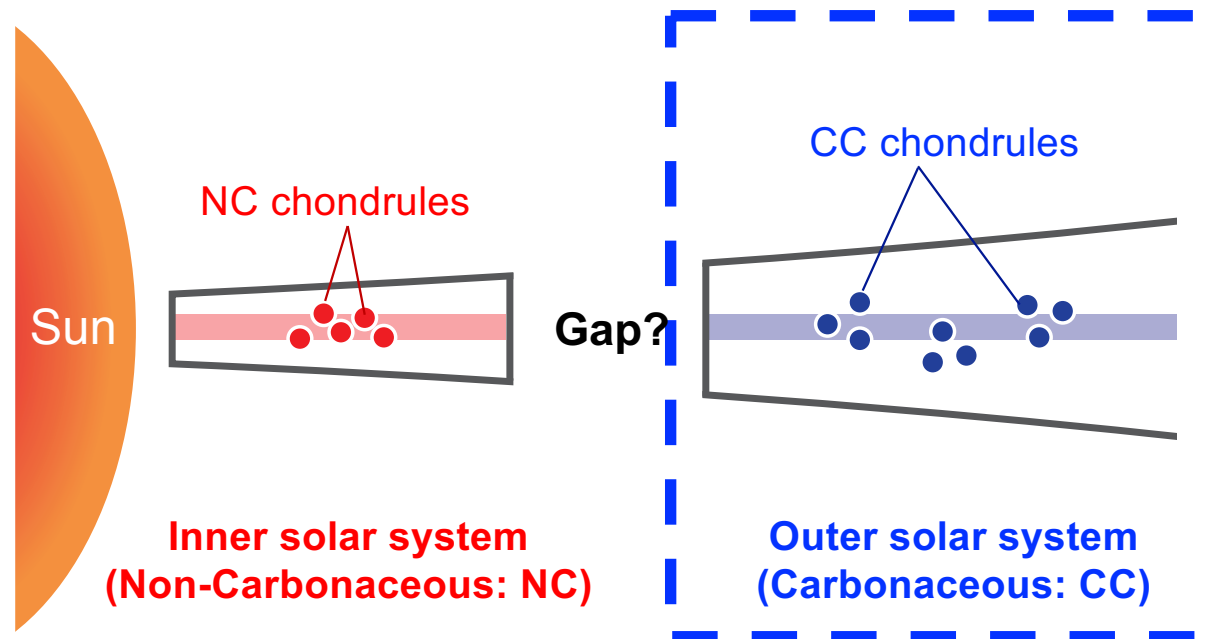
※ 例外あり (Williams+2020 *PNAS*; Fukuda+2024 *MAPS*)

コンドロールの形成領域: 安定同位体比からの示唆

8/23



Schneider+(2020) *EPSL*

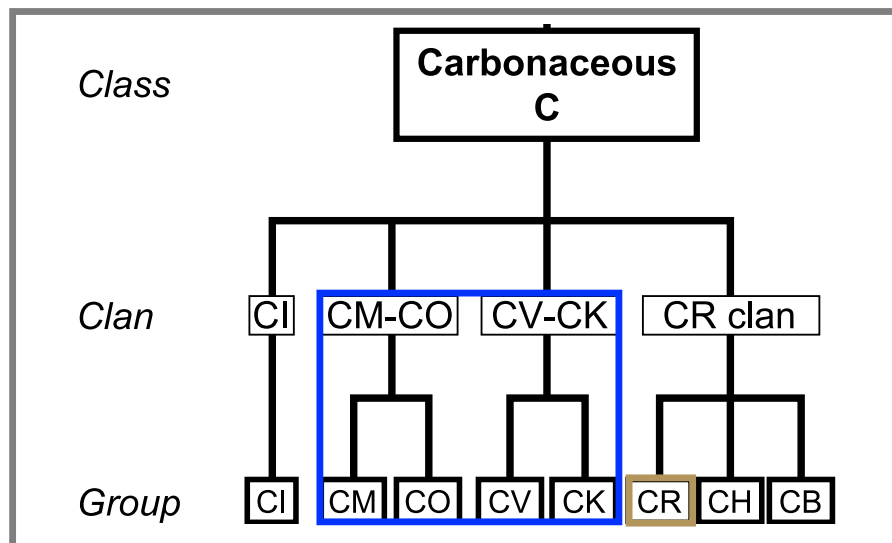


NCコンドロールは内側太陽系、**CCコンドロール**は外側太陽系で形成

Gerber+(2017) *ApJL*; Schneider+(2020) *EPSL*

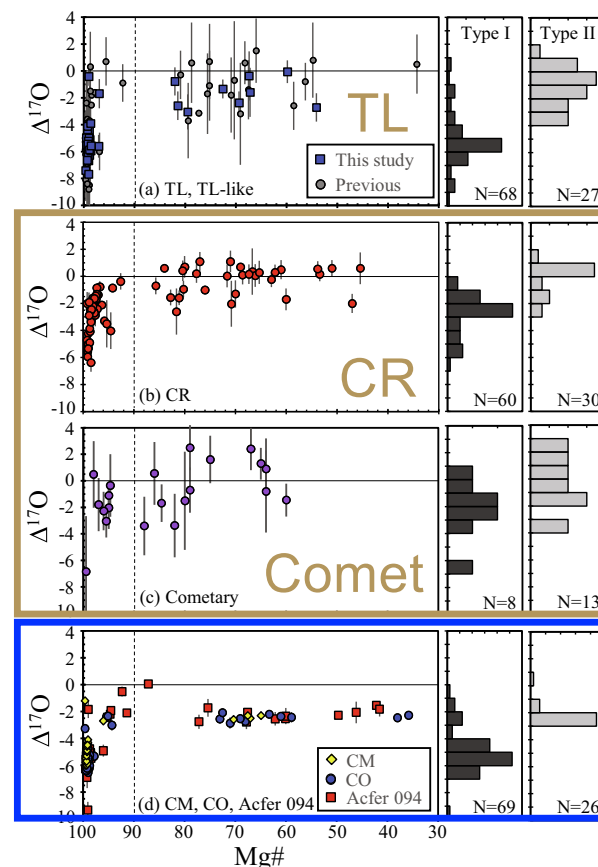
CRコンドルールの $\Delta^{17}\text{O}$ -Mg#は彗星粒子と類似

9/23



- Cr-Mg同位体システムもCRコンドルールの遠方形成を示唆

Van Kooten+(2016) *PNAS*



$\Delta^{17}\text{O}$ の高い
酸化剤の関与?

Major CCs
CV, CM, CO

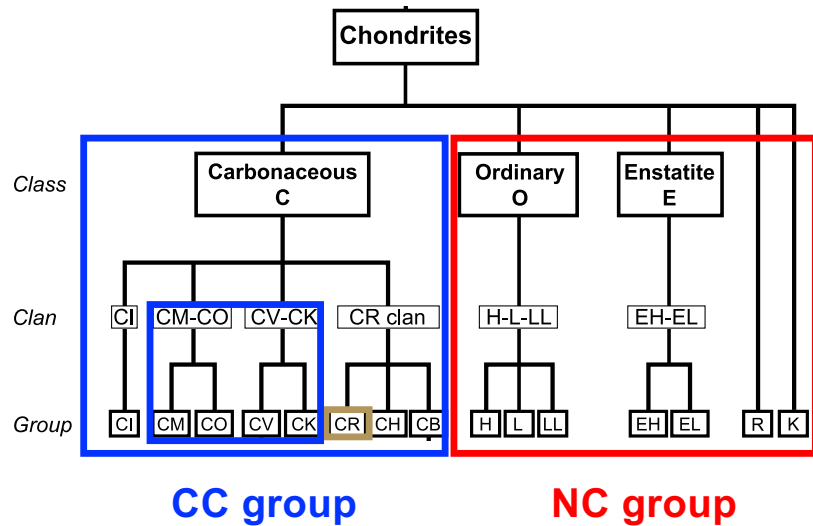
Ushikubo & Kimura (2021) *GCA*

CRコンドルールや彗星粒子は主要なCCコンドルールよりも遠方で形成

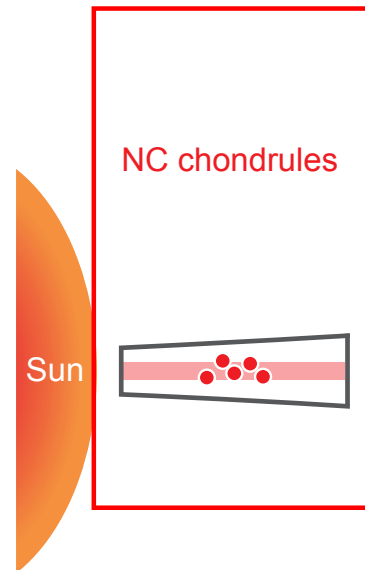
e.g., Nakashima+(2012) *EPSL*; Zhang+(2024) *GCA*

コンドロールの形成領域: 安定同位体比からの示唆

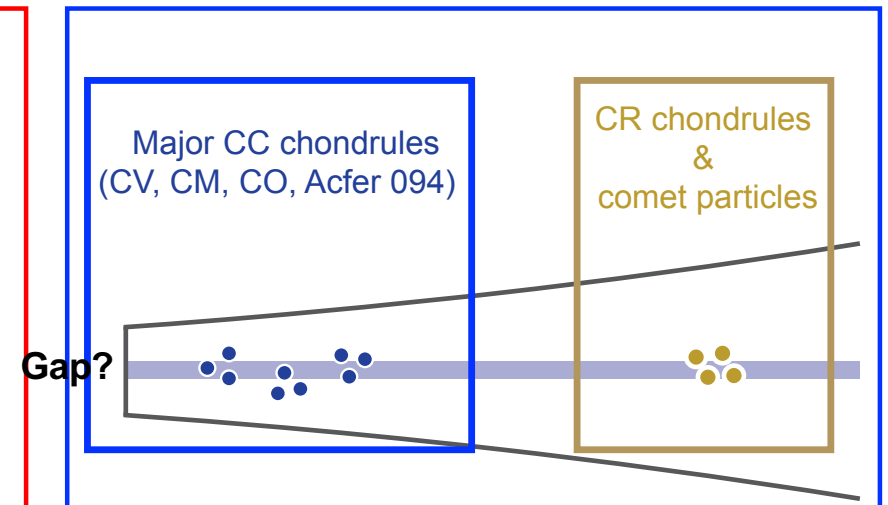
10/23



Inner solar system
(NC reservoir)



Outer solar system
(CC reservoir)

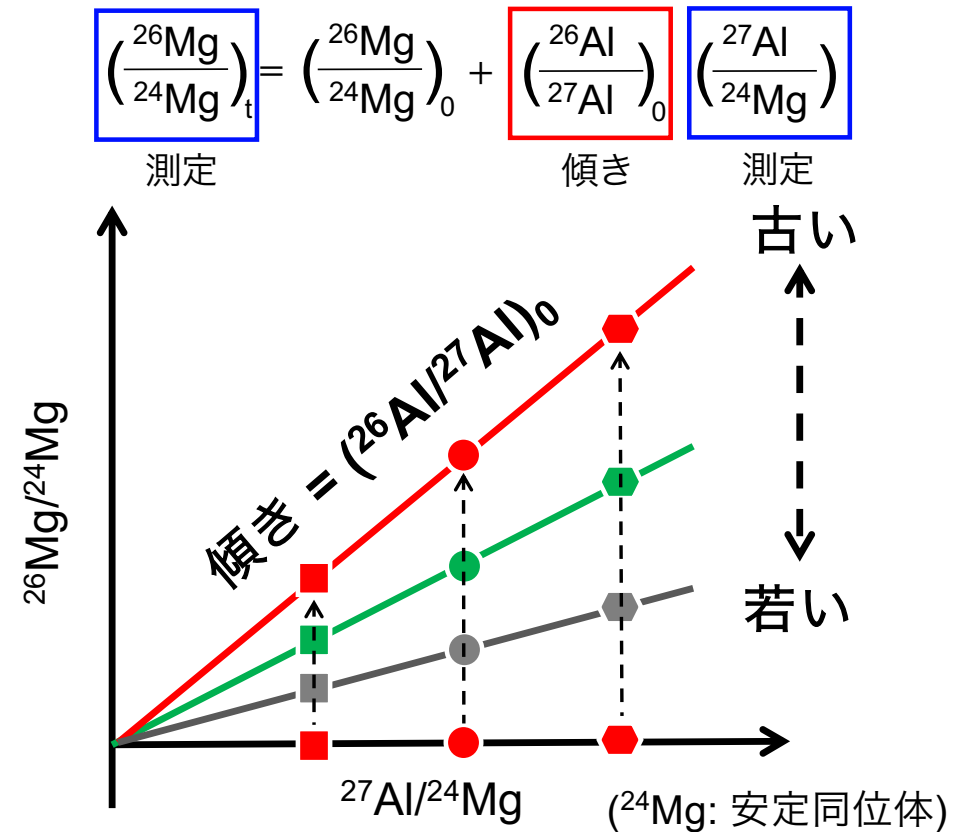
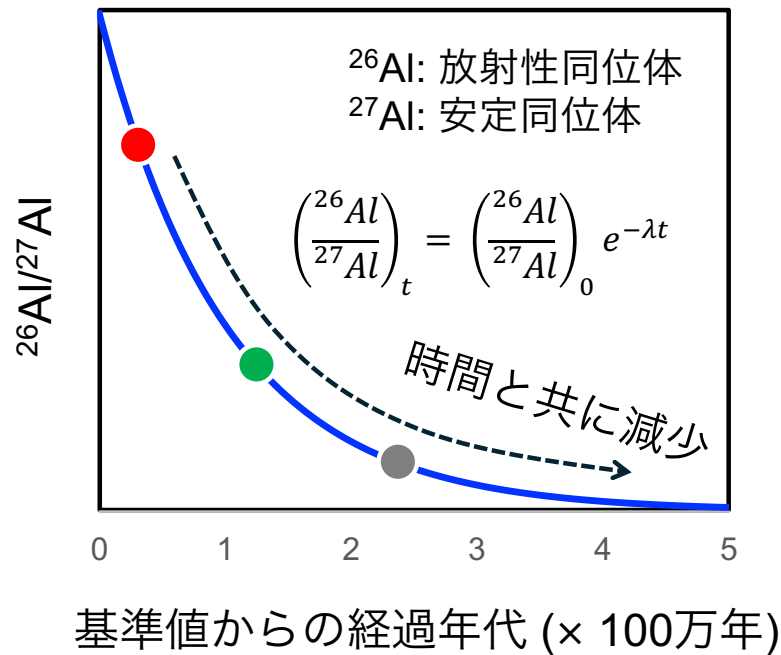
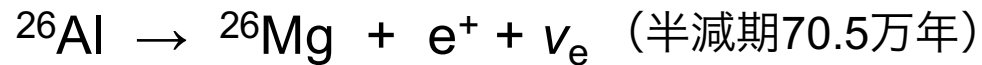


Outline

1. コンドルールの形成領域: 安定同位体比からの示唆
2. コンドルールの形成年代: Al-Mg年代からの制約
3. コンドルール形成と母天体集積の関連

^{26}Al - ^{26}Mg 年代測定法

11/23



^{26}Al : 短寿命 & 太陽系の主要元素のひとつ → 応用範囲が広い

相対年代値の算出

12/23

$$\Delta t_{CAI} (\text{Ma}) = \ln \left[\frac{(^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al})_{0, \text{Sample}}}{(^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al})_{0, \text{CAI}}} \right] \times \frac{0.705}{\ln 2}$$

- **Ca-Al-rich Inclusion (CAI):** 凝縮温度の高い鉱物から成る

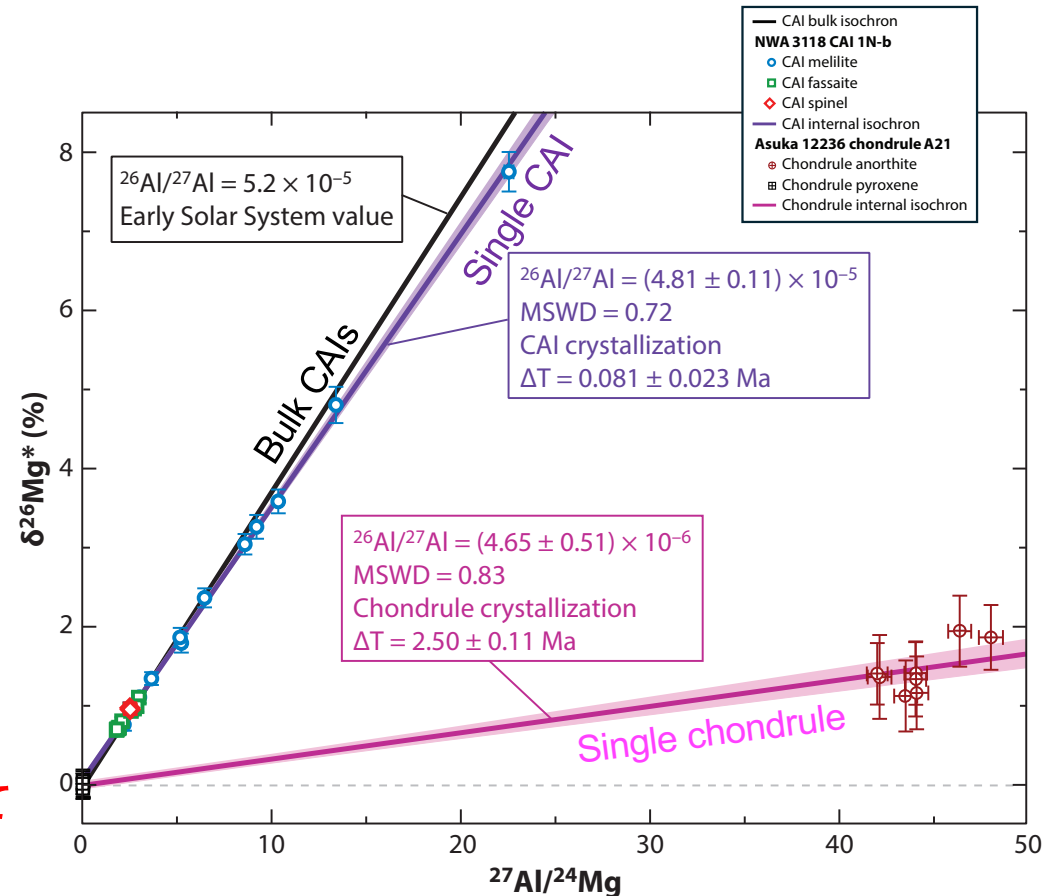
→ 星雲ガスからの初期凝縮物

※ 凝縮後溶融したものもある

- $(^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al})$ の変動要因が放射壊変にのみ依存するという前提が必要

→ **CAI形成時点で原始太陽系円盤において $(^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al})$ が均一であったことを仮定**

※ 議論中 (e.g., Desch+2023 *Icarus*; Iizuka+2025 *ApJL*)

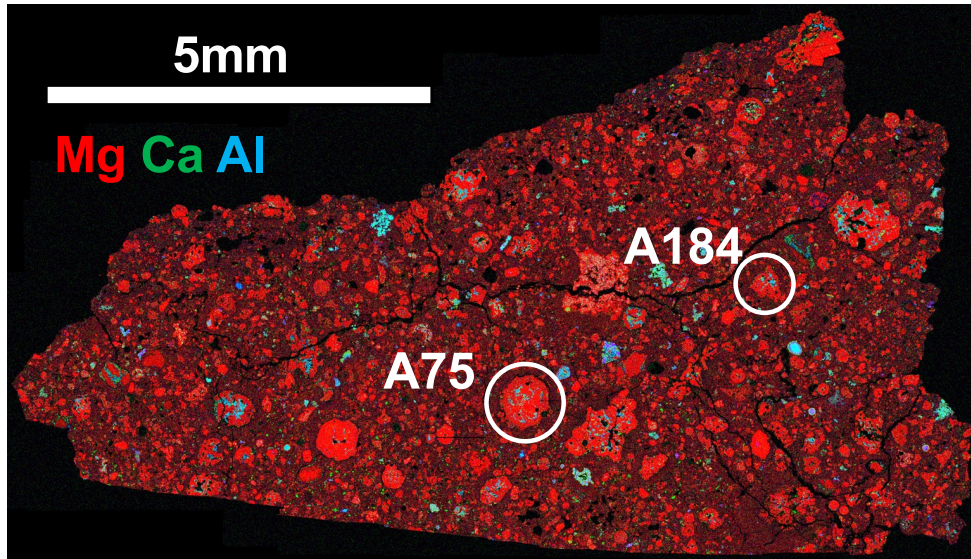


Davis+(2022) *Annu. Rev. Nucl. Par.*

コンドルールの ^{26}Al - ^{26}Mg 年代測定例

13/23

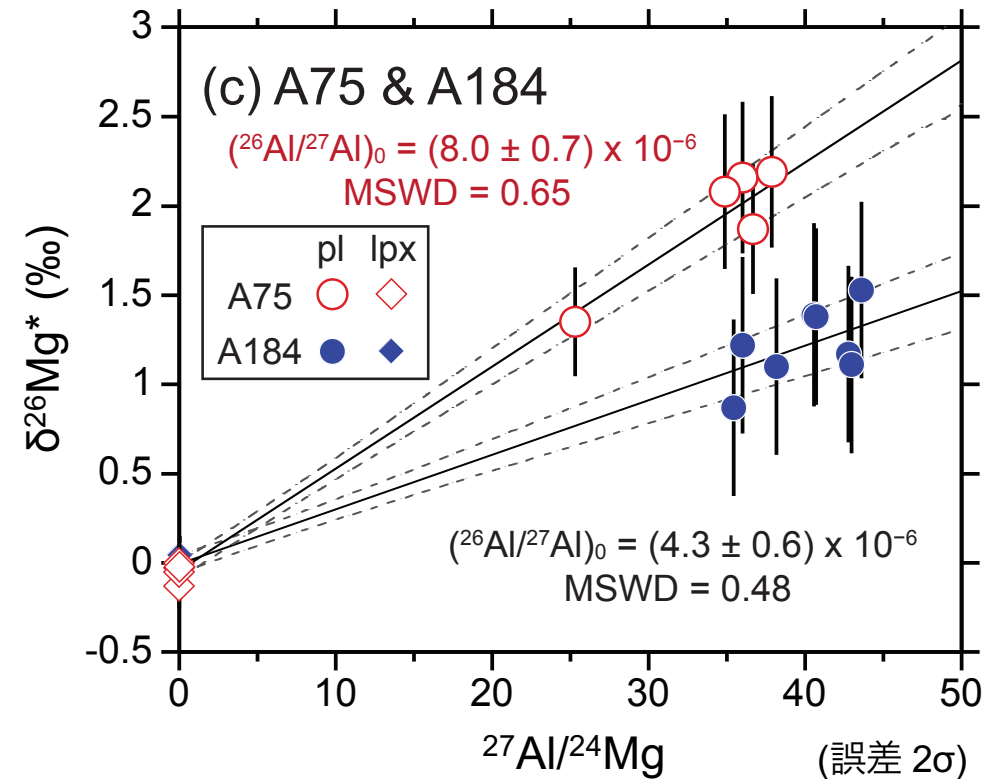
Asuka 12236 (CM2.9)



A75: CAI形成後 $\sim 192 \pm 9$ 万年

A184: CAI形成後 $\sim 255 \pm 15$ 万年

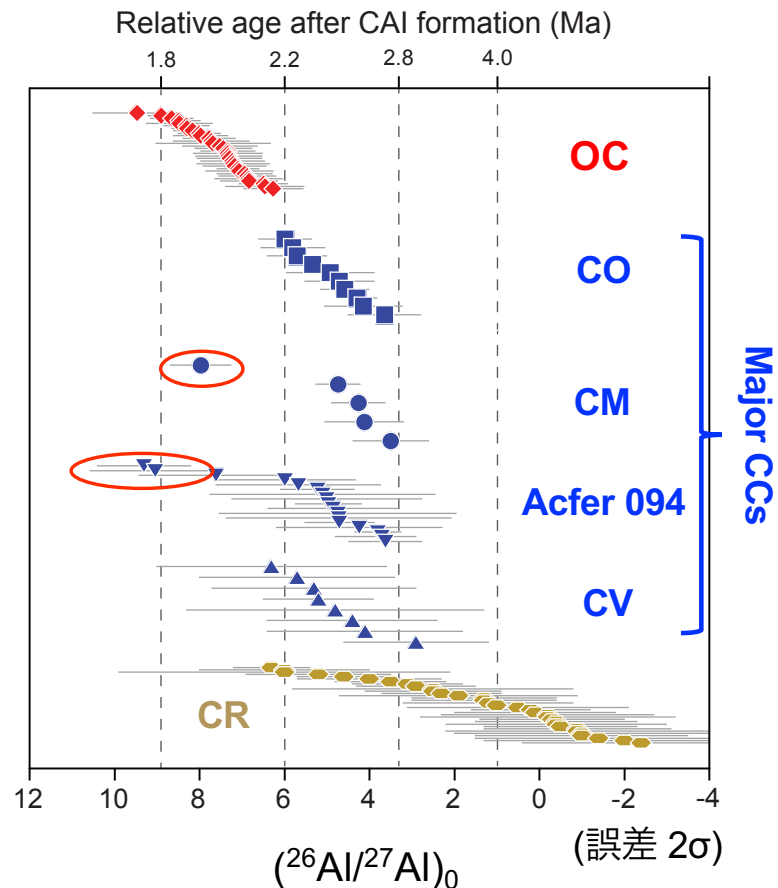
Fukuda+(2022) **GCA**



>40万年の年代差を示すコンドルールが同一隕石母天体に集積

隕石グループ毎のコンドルールAl-Mg年代

14/23



Data sources: [1] Siron+(2021) **GCA**, [2] Siron+ (2022) **GCA**,
[3] Ushikubo+(2013) **GCA**, [4] Hertwig+(2019) **GCA**, [5] Nagashima+(2017) **GCA**,
[6] Nagashima+ (2014) **Geoch**, [7] Schrader+(2017) **GCA**,
[8] Tenner+(2019) **GCA** [9] Fukuda+(2022) **GCA**,

OCコンドルール (N = 31)

- CAI形成後~180-220万年に形成

Siron+(2021, 2022) **GCA**

主要なCCコンドルール (N = 40)

- OCコンドルールよりも遅れて形成 (~220-280万年)
- OCコンドルールと同時期に形成したものもある

e.g., Fukuda+(2022) **GCA**

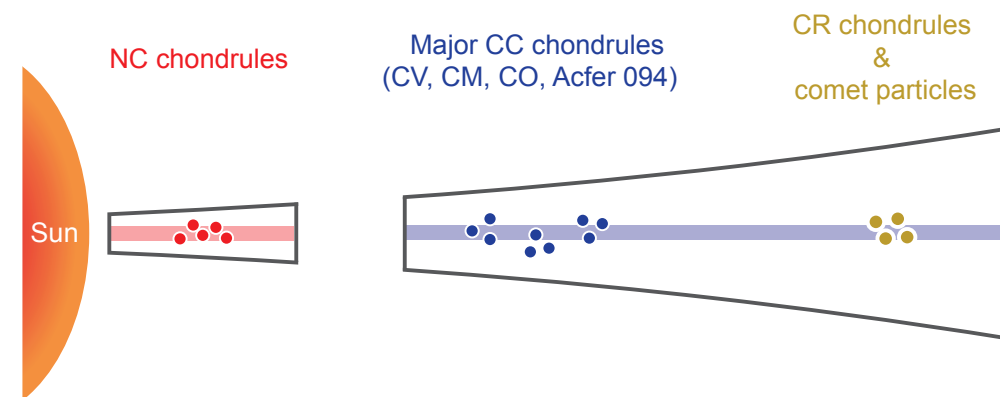
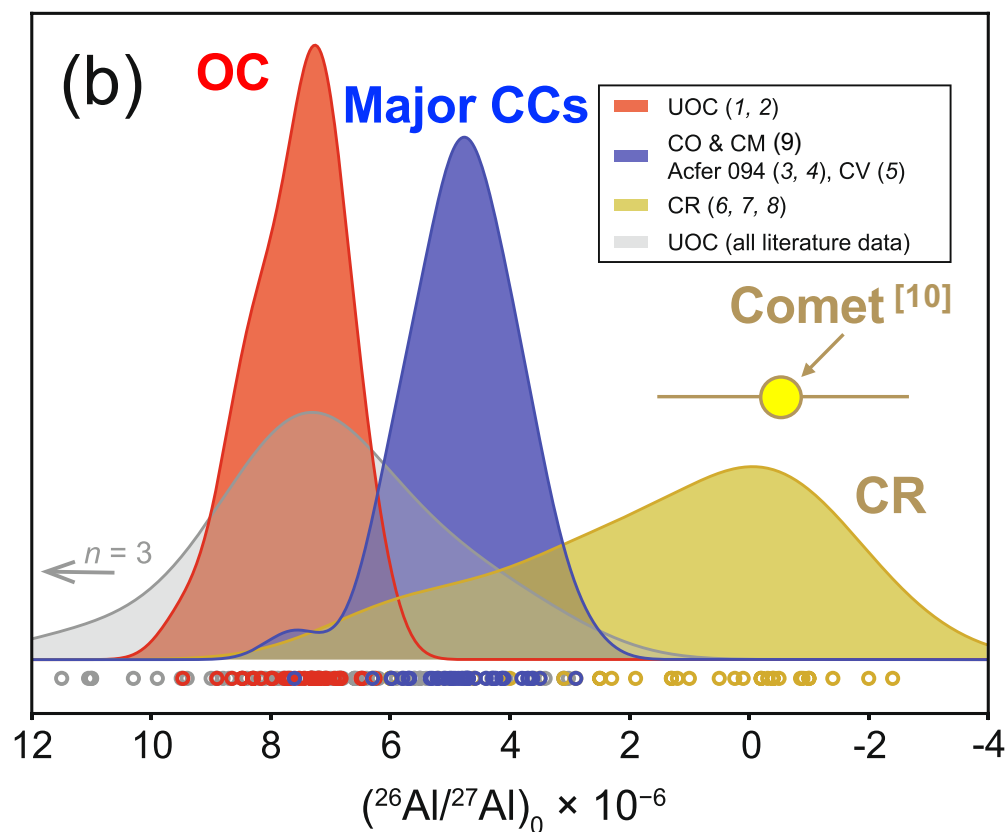
CRコンドルール (N = 33)

- 主要なCCよりも遅れて形成したものが多い
(年代ピーク~360万年)

Nagashima+(2014) **GCA**; Schrader+(2017) **GCA**; Tenner+(2019) **GCA**

隕石グループ毎のコンドルールAl-Mg年代

15/23



コンドールの形成は内側太陽系から
外側太陽系へと遷移した
(Fukuda+2022. **GCA**)

Data sources: [1] Siron+(2021) **GCA**, [2] Siron+ (2022) **GCA**, [3] Ushikubo+(2013) **GCA**, [4] Hertwig+(2019) **GCA**, [5] Nagashima+(2017) **GCA**, [6] Nagashima+ (2014) **Geoch**, [7] Schrader+(2017) **GCA**, [8] Tenner+(2019) **GCA** [9] Fukuda+(2022) **GCA**, [10] Zhang+(2024) **ApJ**

原始太陽系円盤における ^{26}Al の分布

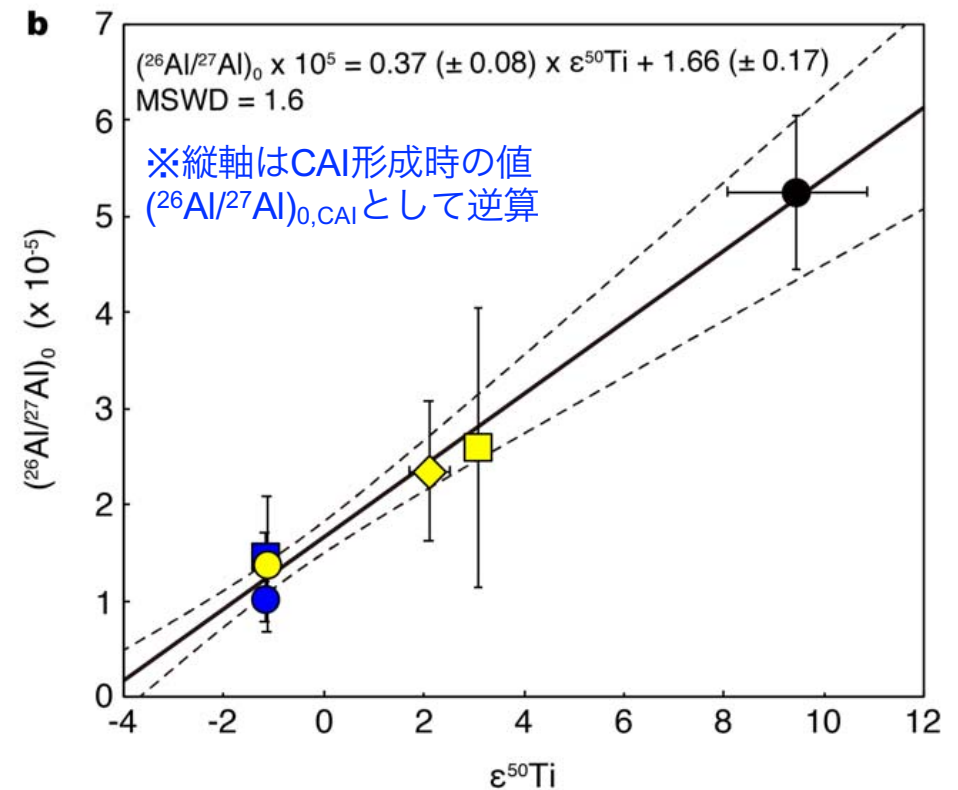
16/23

- 同一物質の絶対年代（U-Pb）と Al-Mg年代間の不一致

e.g., Bollard+(2019) *GCA*; Connelly+(2023) *ApJL*

- $(^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al})_0$ と同位体異常が相関
→ $(^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al})_0$ と同位体異常の同時決定
に基づいた年代補正

lizuka+(2025) *ApJL*

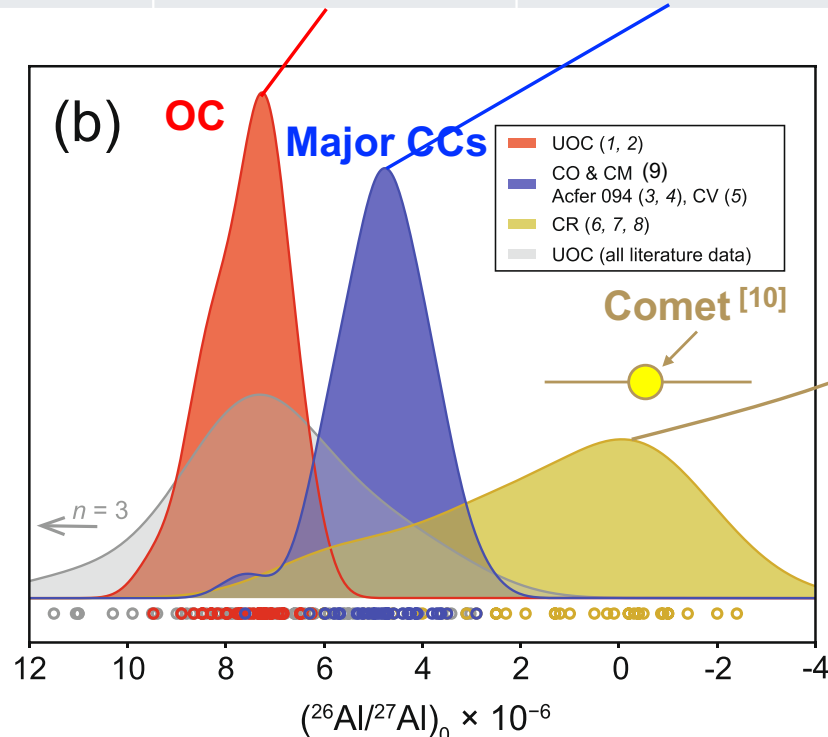


lizuka+(2025) *ApJL*

(preliminary) Ti同位体を用いたAl-Mg年代の補正

17/23

	OC	Major CCs	CR + Comets
均一モデル	2.0 Myr	2.4 Myr	~3.6 Myr
不均一モデル※	0.6 Myr	1.8 Myr	3.0 Myr



※補正式 $(^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al})_0 \times 10^5 = 0.37 \times \epsilon^{50}\text{Ti} + 1.66$
lizuka+(2025) *ApJL*

※コンドルールのTi同位体比が母岩隕石と同一とし、CAI形成時の $(^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al})_0$ を計算

□ CAIの絶対年代のバリエーションやコンドルールのPb-Pbデータの解釈によって結論 (均一 or 不均一) が異なるので注意

See Desch+(2023a, 2023b) *Icarus*

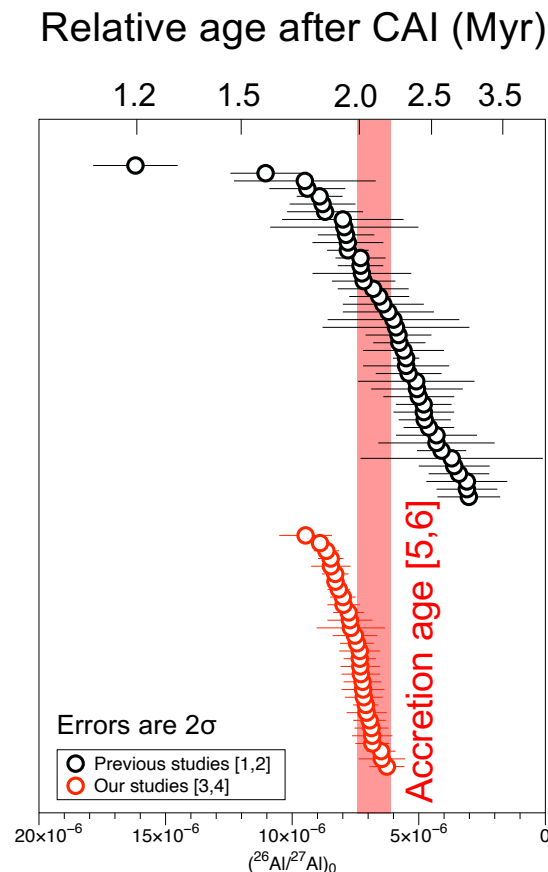
Data sources: [1] Siron+(2021) *GCA*, [2] Siron+ (2022) *GCA*, [3] Ushikubo+(2013) *GCA*, [4] Hertwig+(2019) *GCA*, [5] Nagashima+(2017) *GCA*, [6] Nagashima+ (2014) *GeocJ*, [7] Schrader+(2017) *GCA*, [8] Tenner+(2019) *GCA* [9] Fukuda+(2022) *GCA*, [10] Zhang+(2024) *ApJ*

Outline

1. コンドルールの形成領域: 安定同位体比からの示唆
2. コンドルールの形成年代: Al-Mg年代からの制約
3. コンドルール形成と母天体集積の関連
 - ・ コンドルール形成から母天体集積までのタイムスケール
 - ・ 円盤外側方向のダスト輸送

OCコンドルールの形成年代と母天体集積年代

18/23



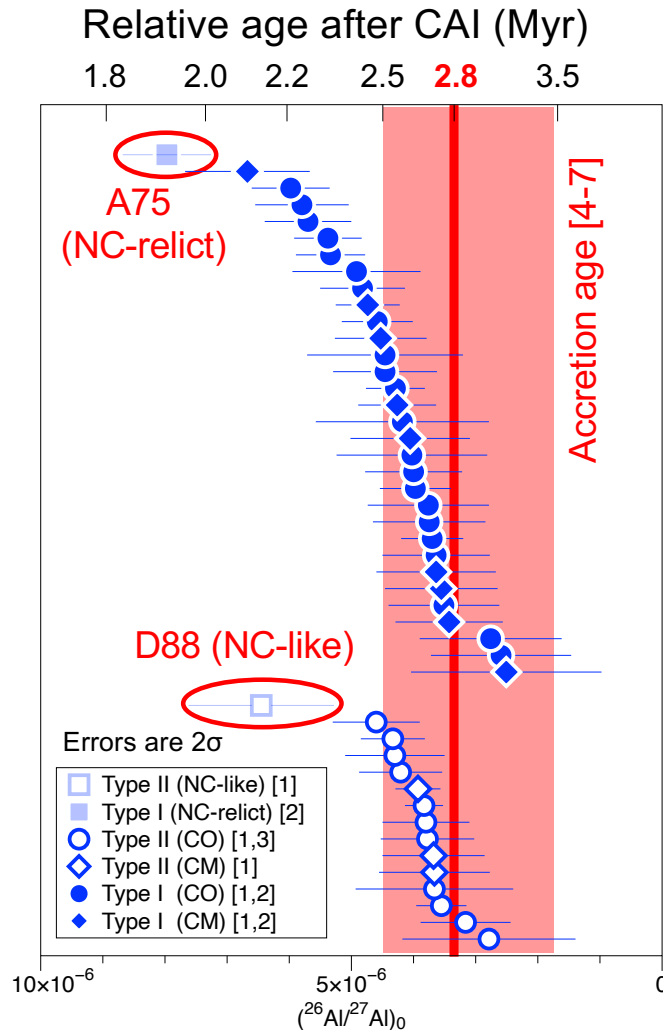
- ❑ 熱変成に敏感なガラスを含めた分析
(CAI形成後120-300万年) [1,2]
→ 180万年間の継続的コンドルール形成
母天体形成よりも遅いコンドルール形成？
- ❑ 熱変成度の極めて低い始原的な隕石中コンドルールの斜長石を分析 (CAI形成後180-220万年) [3,4]
→ 短期的コンドルール形成 (40万年)
- ❑ 若いコンドルールの年代は集積年代と一致
(200-225万年 [5,6])
→ コンドルール形成後の早期母天体集積を示唆 [7]

[1] Villeneuve+(2009) **Science** [2] Pape+(2019) **GCA** [3] Siron+(2021) **GCA** [4] Siron+(2022) **GCA** [5] Sugiura & Fujiya (2009) **MAPS**

[6] Edwards & Blackburn (2020) **SciAdv** [7] Alexander+(2008) **Science**

CM・COコンドルールの形成年代と母天体集積年代

19/23



- Type I ($\text{Mg}\# > 90$)とtype II ($\text{Mg}\# < 90$)の年代は重複

→ 還元的 ($\text{IW} -3.5$)、酸化的 ($\text{IW} -2 \sim -1$) 環境が共存

Ushikubo+(2012) *GCA*

- Type I ($\text{Mg}\# > 90$)形成が先行

→ 還元的環境がより長期間存在

Fukuda+(2024) *Metsoc Abstract*

- 若いコンドルールの年代は集積年代と重複

(250-350万年 [4-7])

→ Type IIコンドルール形成後の早期母天体集積

References: [1] Fukuda+(2024).*Metsoc Abst* [2] Fukuda+(2022).*GCA* [3]

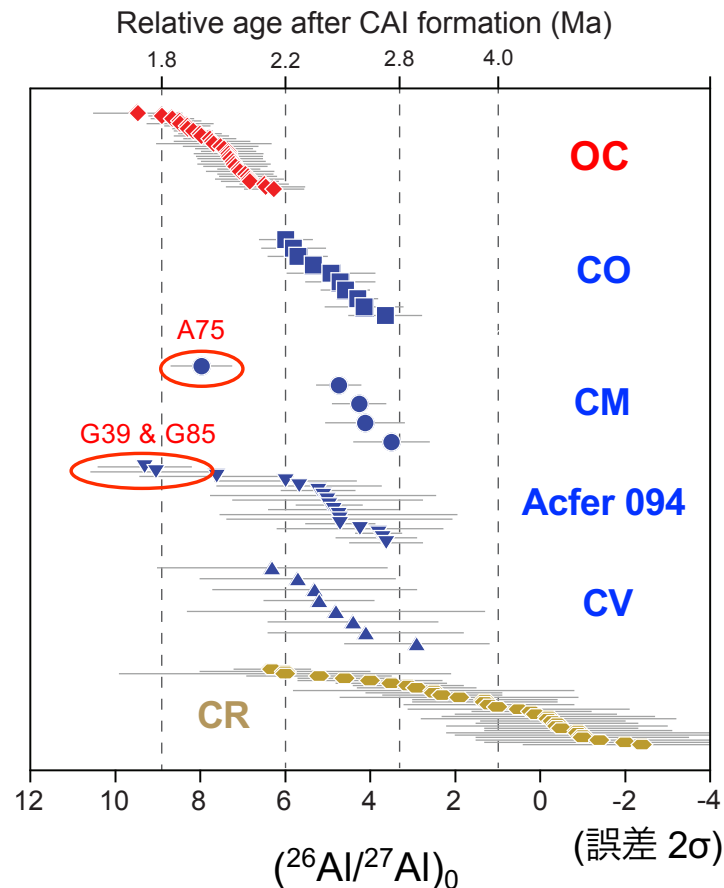
Kita+(2019).*LPSC*

[4] Fujiya+(2012).*NatComm* [5] Fujiya+(2022).*ApJL* [6] Sugiura & Fujiya (2014).*MAPS*

[7] Doyle+(2015).*NatComm*

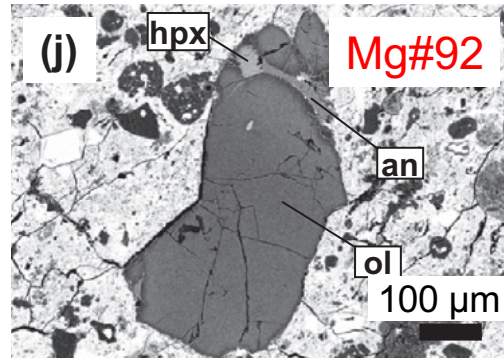
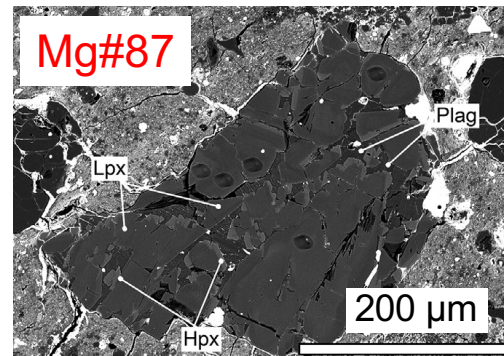
CC隕石に見つかった古い年代を示すコンドルール

20/23

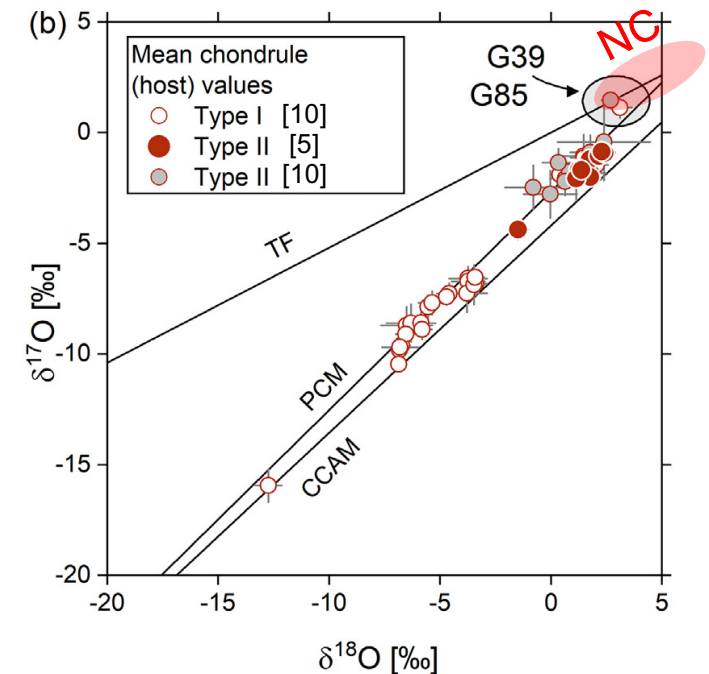


Data sources: [1] Siron+(2021) **GCA**, [2] Siron+ (2022) **GCA**, [3] Fukuda+(2022) **GCA**, [4] Ushikubo+(2013) **GCA**, [5] Hertwig+(2019) **GCA**, [6] Nagashima+(2017) **GCA**, [7] Nagashima+ (2014) **GeocJ**, [8] Schrader+(2017) **GCA**, [9] Tenner+(2019) **GCA**

NC-like $\text{Mg}\#\text{-}\Delta^{17}\text{O}$ (G85)



NC-like $\text{Mg}\#\text{-}\Delta^{17}\text{O}$ (G39)



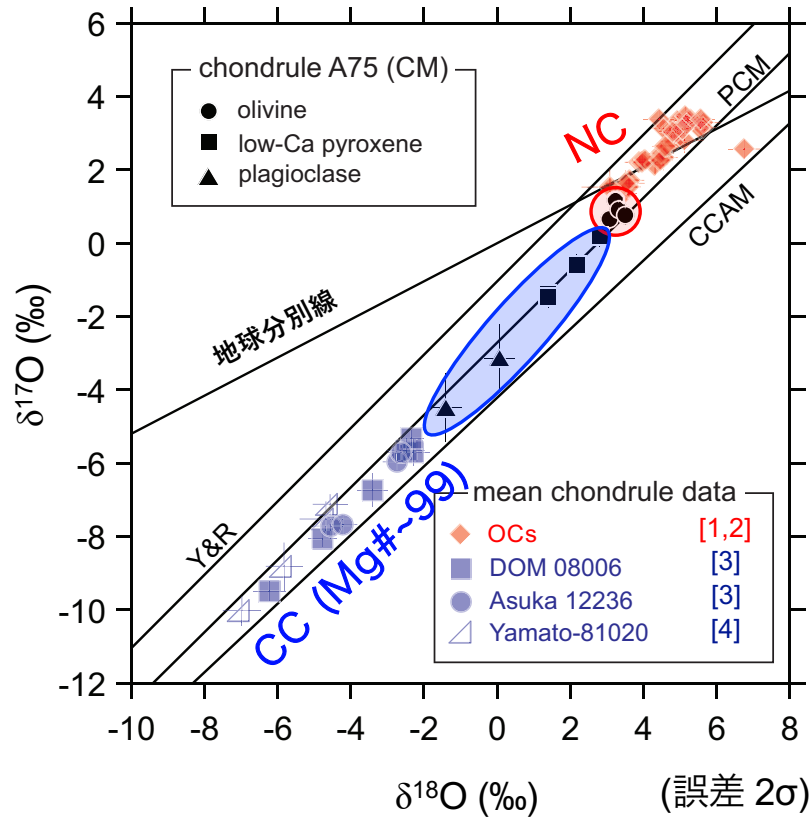
Data sources: [5] Hertwig+(2019) **GCA** [10] Ushikubo+(2012) **GCA**

OCコンドルールの外側方向への輸送？

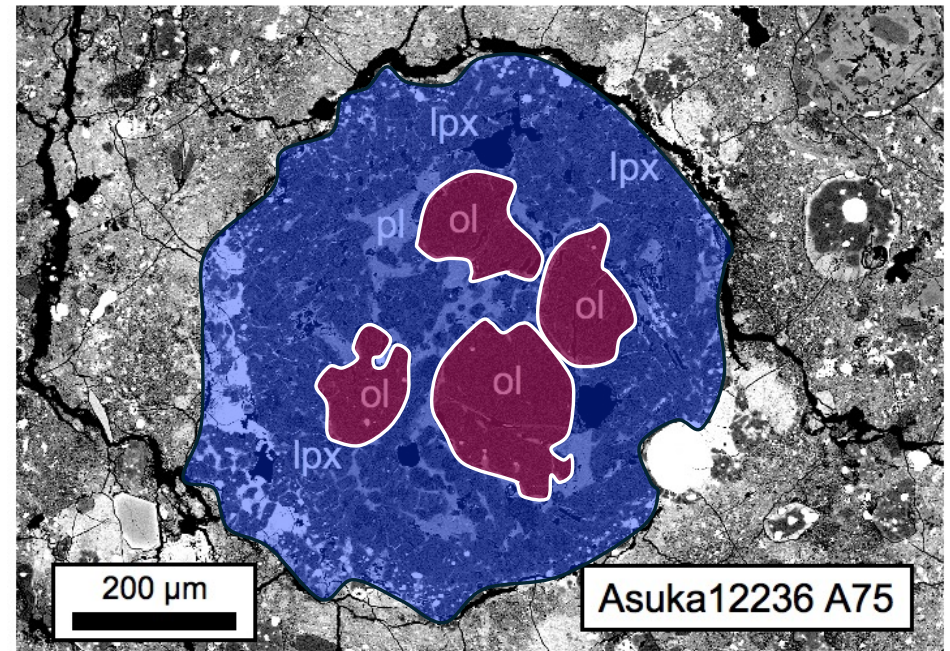
Hertwig+(2019) **GCA**

NCレリクト物質を含むCCコンドルール

21/23



Data sources: [1] Siron+ (2021) *GCA*, [2] Siron+ (2022) *GCA*, [3] Fukuda+ (2022) *GCA*, [4] Tenner+ (2013) *GCA*,



$$(^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al})_{0,\text{plag}} = (8.0 \pm 0.7) \times 10^{-6}$$

再溶融の時期: CAI形成後192($\pm$ 9)万年

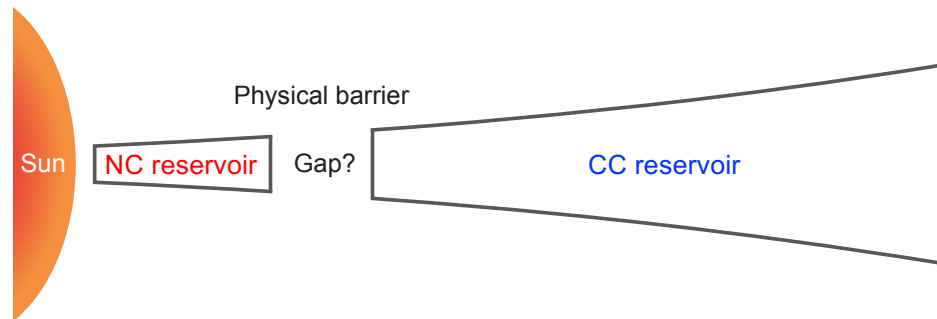
NC物質の外側輸送 → 再溶融

Fukuda+ (2022) *GCA*

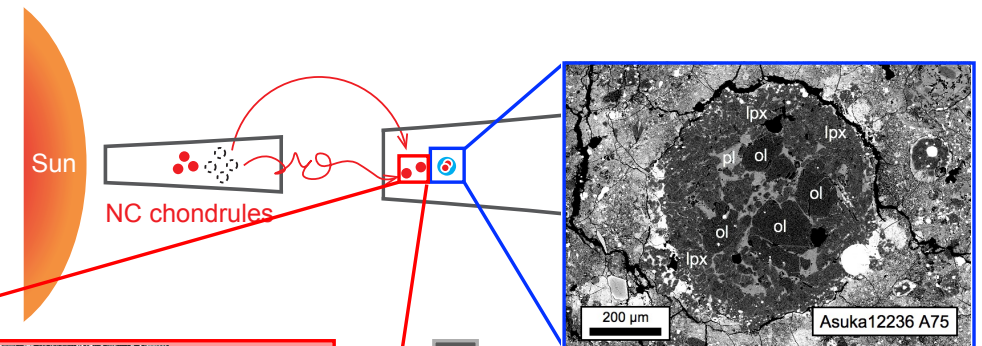
コンドロールの形成・輸送・集積

22/23

(a) Formation of a physical barrier between NC-CC reservoirs ($t \leq 1$ Ma)

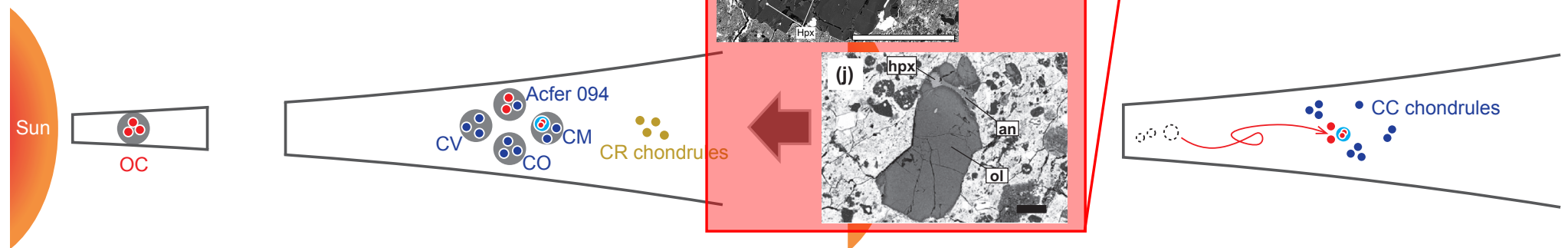


(b) Majority of OC chondrule formation ($t \leq 2.2$ Ma)



Fukuda+(2022).GCA

(d) Majority of CR chondrule formation ($t \geq 2.8$ Ma)



Ushikubo+(2012,2013).GCA; Hertwig+(2019)GCA

Modified after Fukuda+(2022) GCA

まとめ

23/23

- ❑ コンドルールの時空間分布は、原始太陽系円盤におけるダスト/ガス比や酸化還元状態の時空間変動、および微惑星の材料物質形成から集積のタイムスケール、円盤内固体物質輸送を明らかにする上で重要
- ❑ コンドルールの形成領域は隕石グループ毎に固有であった可能性
- ❑ コンドルールの形成時期は隕石グループ毎に異なっており、円盤の内側からはじまり、次第に外側へと遷移した
- ❑ NC-likeコンドルールがCC隕石に存在
→ 円盤外側方向へのコンドルール輸送機構が存在？

