

隕石に記録された小惑星の 形成場所と軌道進化

藤谷 渉

茨城大学

Dec. 21, 2018, CPSセミナー

同位体比の表し方 (デルタ値： $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$)

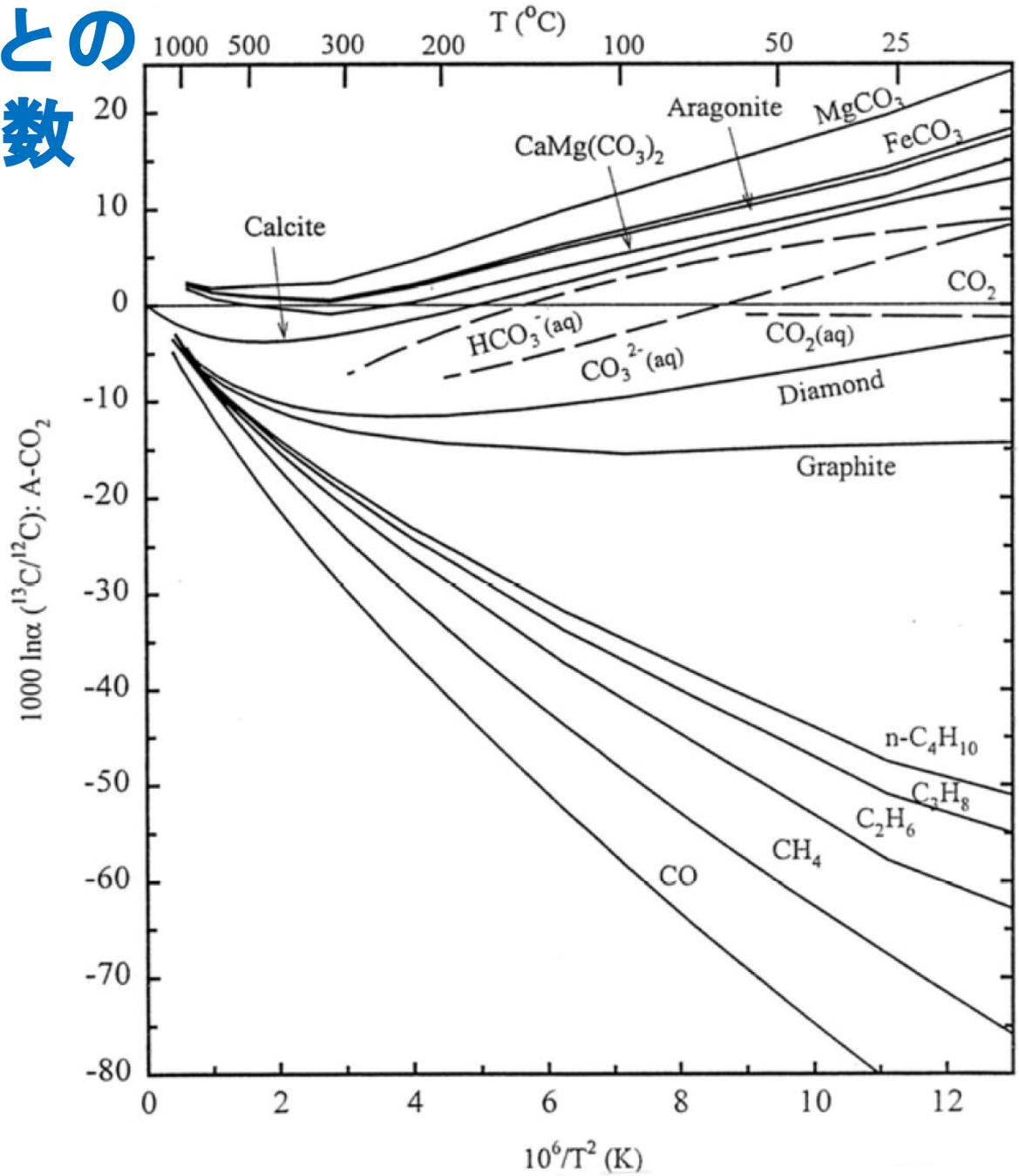
- デルタ値：試料の同位体比 (R_{sample}) を、標準試料の同位体比 (R_{standard}) からのずれ (千分率：パーミル) として表す
- $\delta = (R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}} - 1) \times 1000$
- 炭素の場合は $R = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$ 、標準試料は矢石 (PDB)
- 酸素の場合は $R = {}^{17,18}\text{O}/{}^{16}\text{O}$ 、標準試料は標準海水 (SMOW)

同位体分別係数

- 一般に、同位体交換反応、化学反応速度の差、拡散などの現象によって複数の物質あるいは相の間で同位体が分配される
- 二つの物質a, b間の同位体分別係数 α :
$$\alpha_{a-b} = R_a/R_b$$
- 反応速度や拡散などが無視できる場合（同位体交換平衡）、 α は平衡定数と関連づけられ、定数のように扱われる

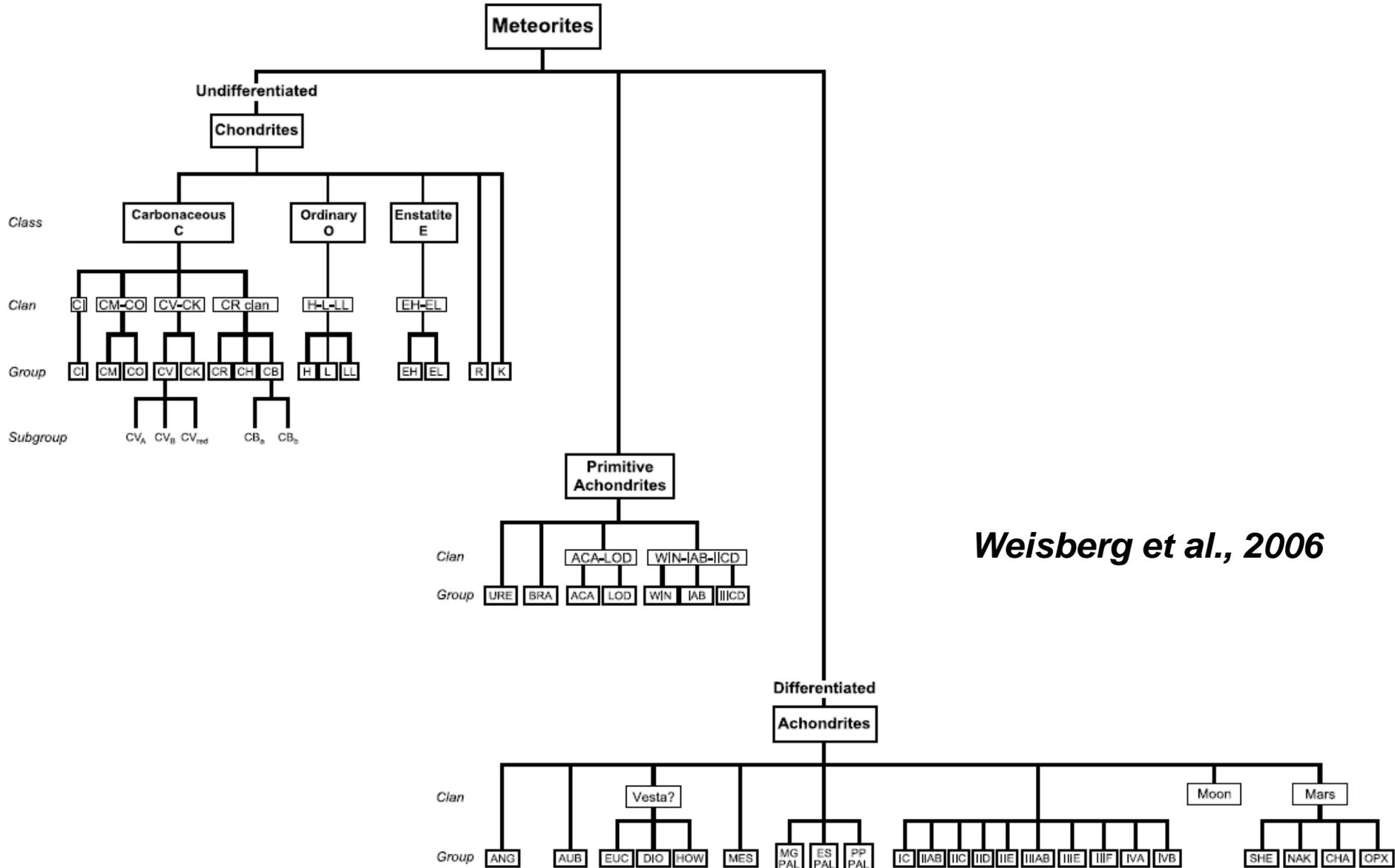
CO₂と他の化学種との間の同位体分別係数

~同位体比（デルタ値）の差



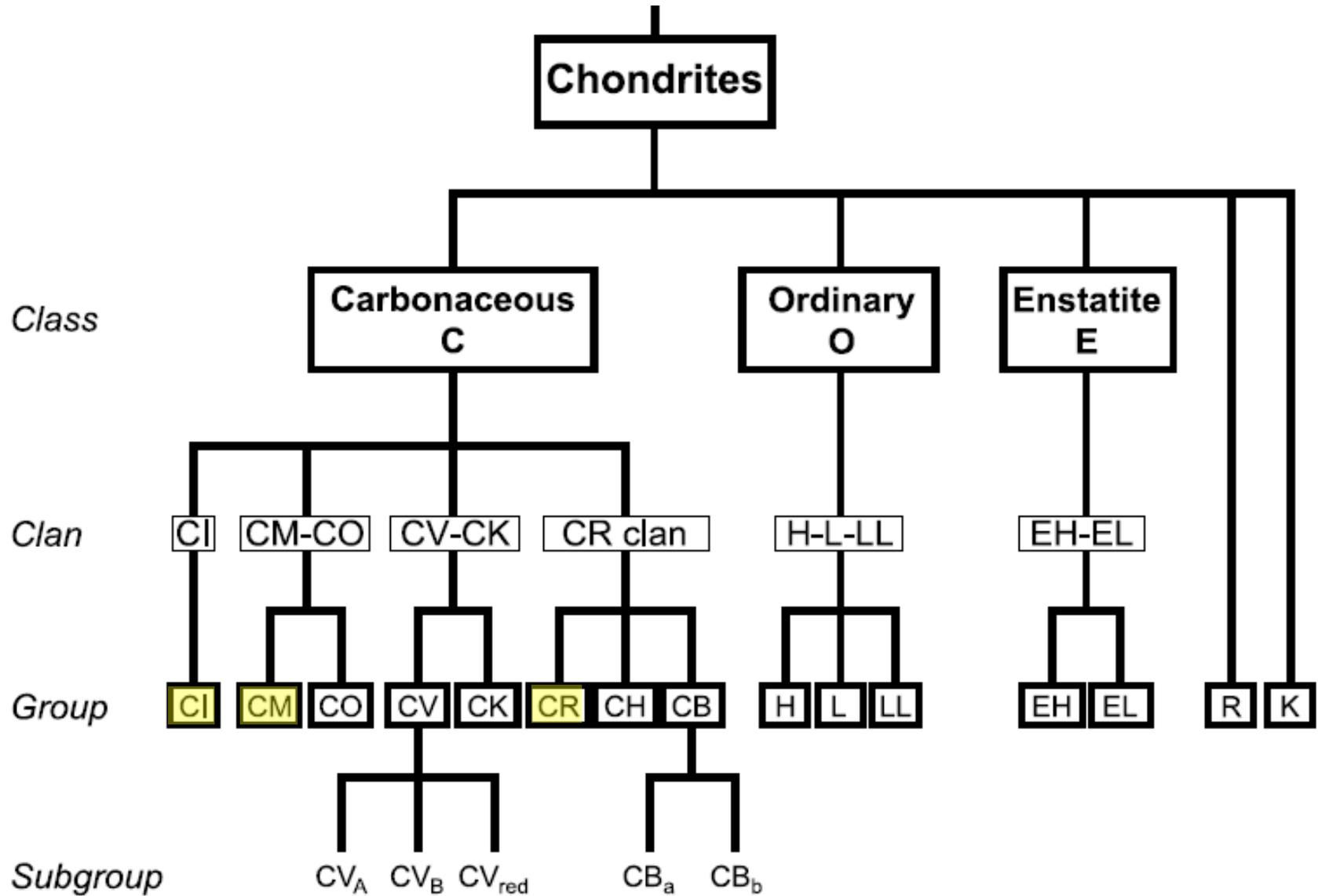
Chacko et al., 2001

隕石の分類



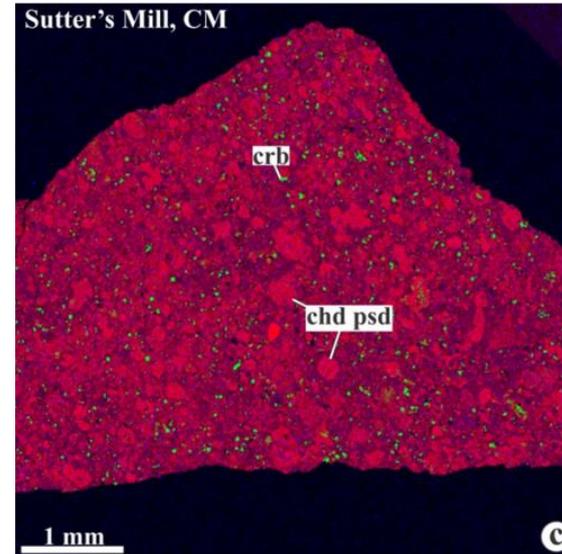
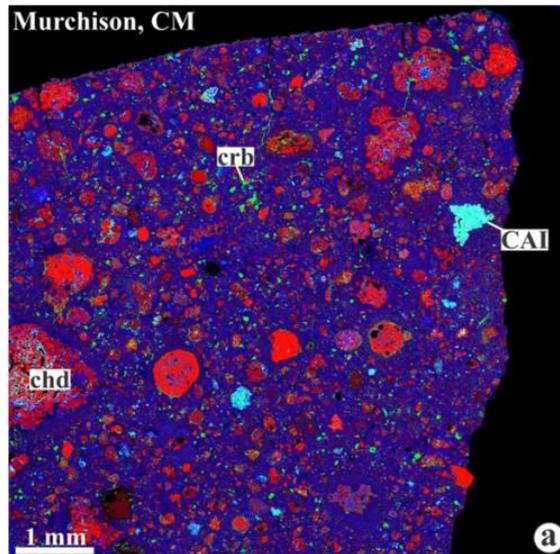
Weisberg et al., 2006

隕石の分類



隕石の水質変成作用

- 母天体における水（もともとは氷）と岩石との相互作用
- 一般にコンドライトは様々な程度に水による変成作用を受けており、特にCI, CM, CRコンドライトで顕著
- CMコンドライトにおける変成作用の温度は $<150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、水/岩石 (vol/vol) 比は <0.5 (Fujiya, 2018)
- 様々な二次鉱物：層状ケイ酸塩鉱物、炭酸塩鉱物、酸化物などの形成 (Brearley, 2006)



Mg – red , Ca – green, Al – blue

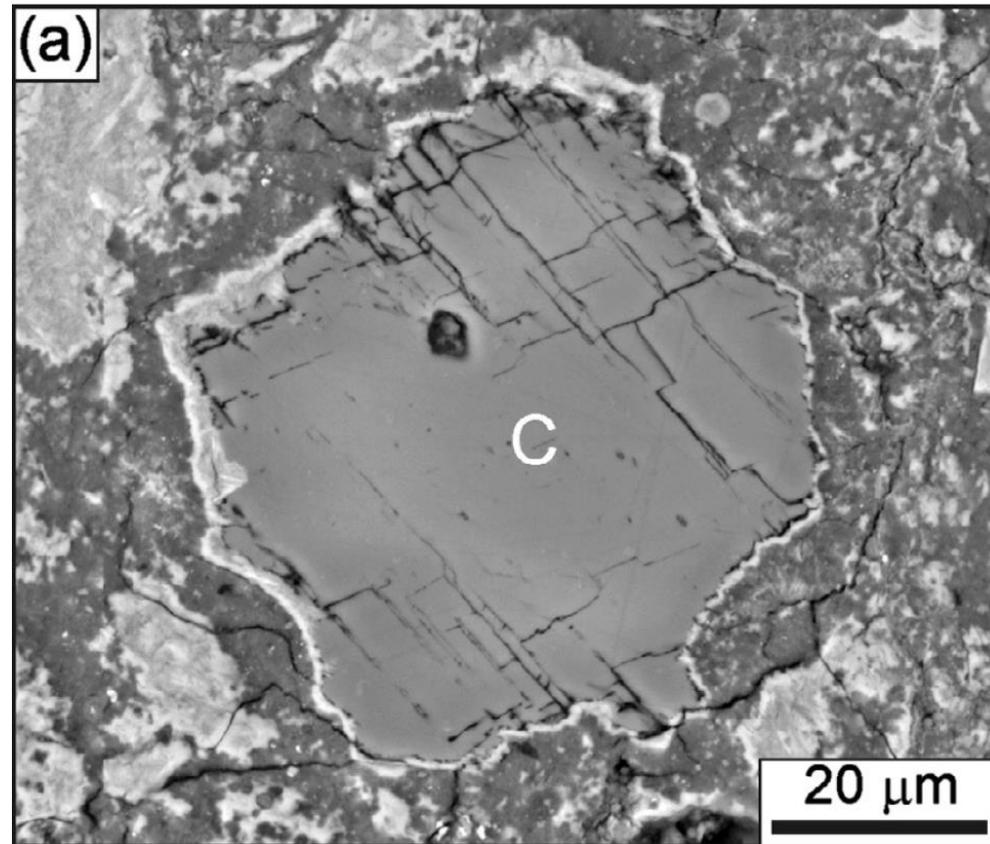
Krot et al., 2015

水質変成作用で生じる二次鉱物

CI Chondrites	CM Chondrites	CR Chondrites	CV Chondrites	CO Chondrites	Ordinary Chondrites
Silicates Fe-Mg serpentines Saponite (smectite)	Silicates Fe-Mg serpentines cronstedtite	Silicates Fe-Mg serpentines saponite	Silicates Fe-Mg serpentine saponite <i>amphibole</i> <i>biopyribole</i> <i>talc</i> <i>margarite</i> <i>clintonite</i> <i>muscovite</i> <i>Na phlogopite</i> <i>montmorillonite</i> <i>chlorite</i>	Silicates Fe-Mg serpentine <i>chlorite</i>	Silicates smectite
Carbonates calcite dolomite breunnerite <i>siderite</i>	<i>chlorite</i> <i>saponite</i> <i>vermiculite</i>	Carbonates <i>calcite</i>			Carbonates <i>calcite</i>
Sulfates gypsum epsomite <i>bloedite</i> <i>Ni bloedite</i>	Tochilinite tochilinite	Oxides magnetite			Oxides <i>maghemite</i>
Sulfides pyrrhotite pentlandite <i>cubanite</i>	Carbonates calcite dolomite <i>aragonite</i>	Sulfides pyrrhotite pentlandite	<i>fayalite</i> hedenbergite diopside wollastonite andradite <i>grossular</i> <i>monticellite</i> kirschteinite nepheline sodalite		Sulfides pyrrhotite pentlandite
Oxides magnetite ferrihydrite	Sulfates gypsum <i>hemihydrate</i> <i>anhydrite</i> thenardite				Halides <i>halite</i>
Native elements <i>sulfur</i>	Oxides <i>magnetite</i>		Carbonates <i>calcite</i>		
	Hydroxides <i>brucite</i>		Sulfides pyrrhotite pentlandite		
	Sulfides pyrrhotite pentlandite		Oxides magnetite ferrihydrite		
	Halides halite sylvite				

Brearley, 2006

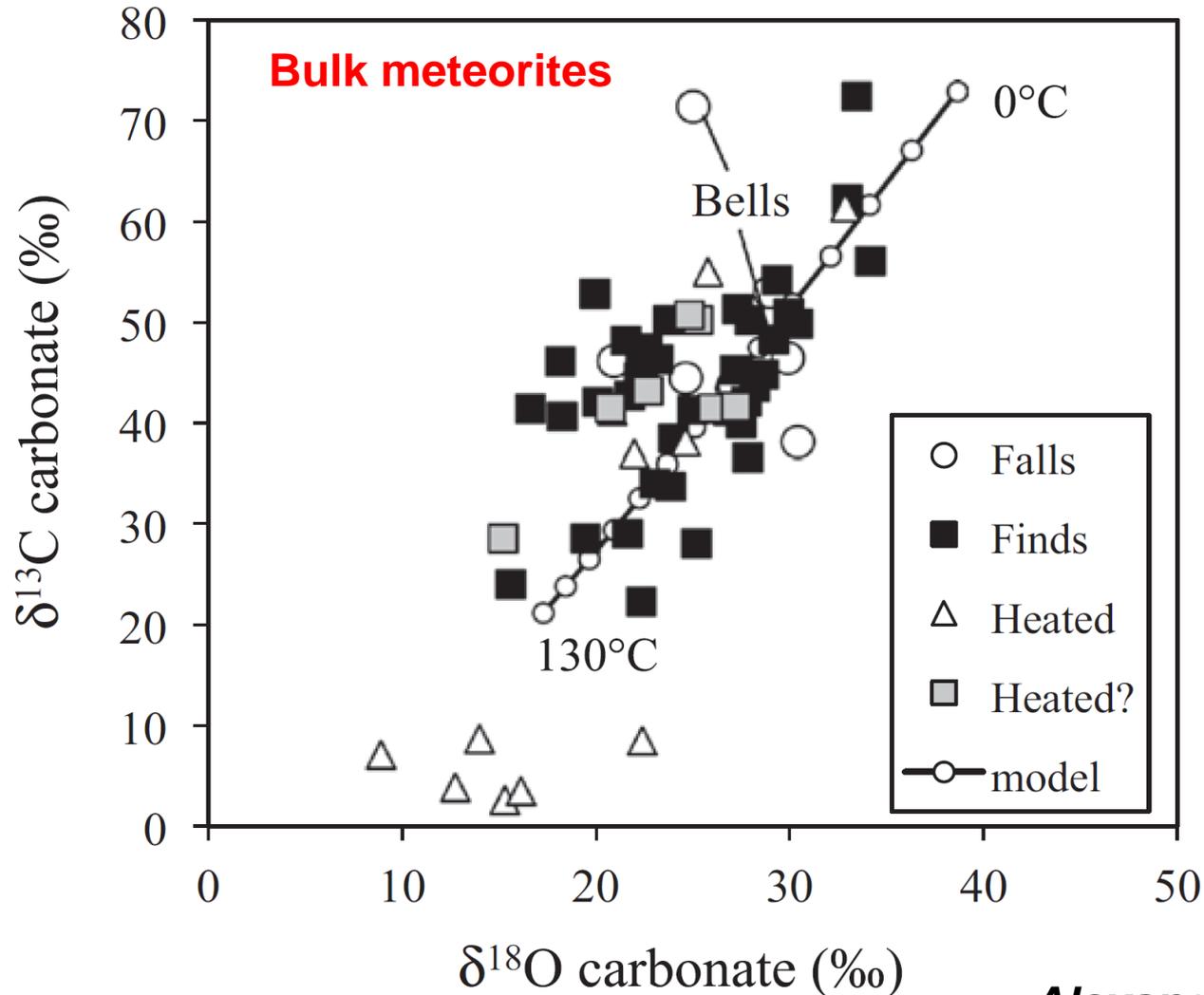
コンドライト中の炭酸塩鉱物



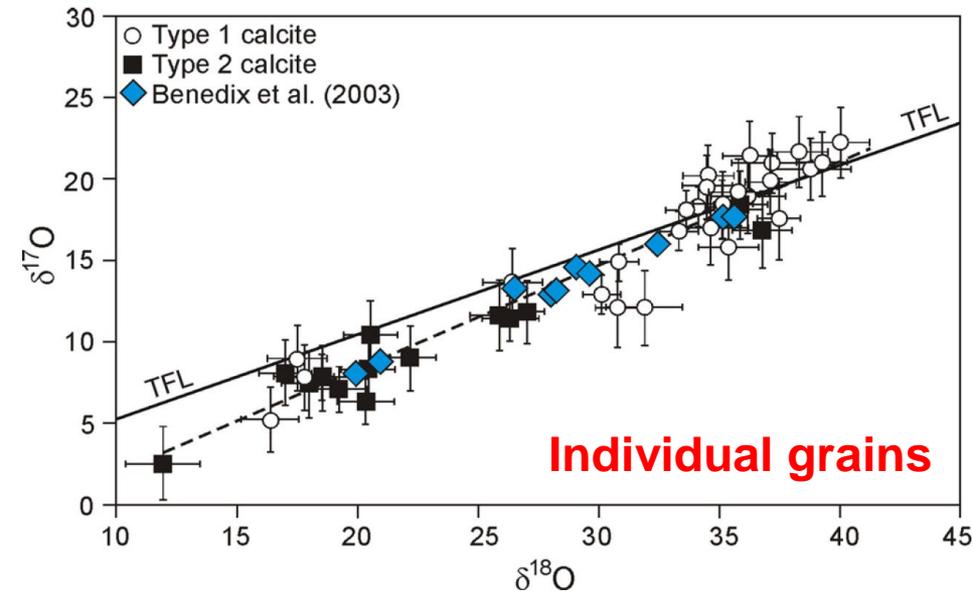
- 母天体上の水質変成作用で形成
- コンドライト中の主な炭酸塩鉱物はカルサイト (CaCO_3) とドロマイト ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)

Lee et al., 2013

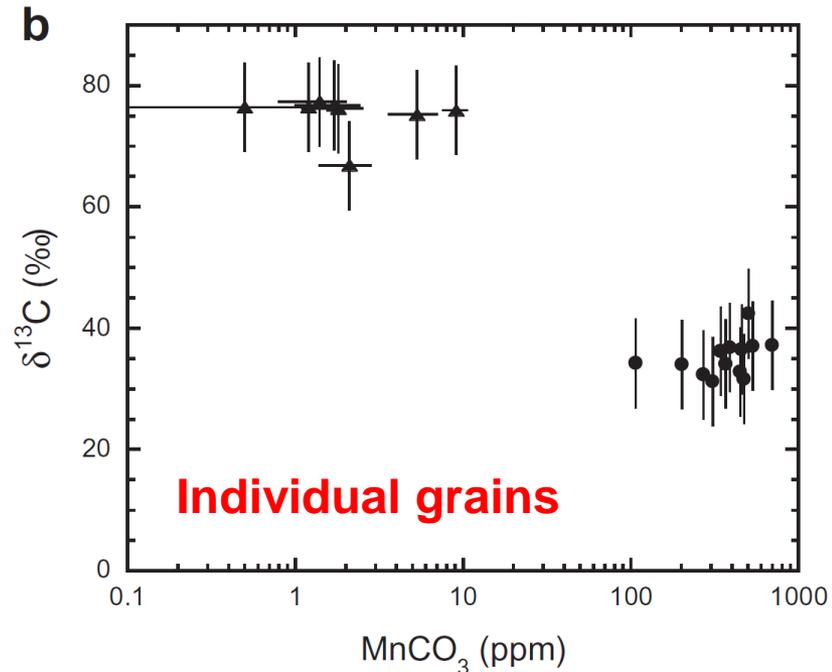
CMコンドライト中の 炭酸塩鉱物の $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ (1)



CMコンドライト中の 炭酸塩鉱物の $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ (2)



Lindgren et al., 2017



Fujiya et al., 2015

- Type I: 空隙の水から析出したもの
- Type II: 他の鉱物（ケイ酸塩鉱物など）を置き換えたもの

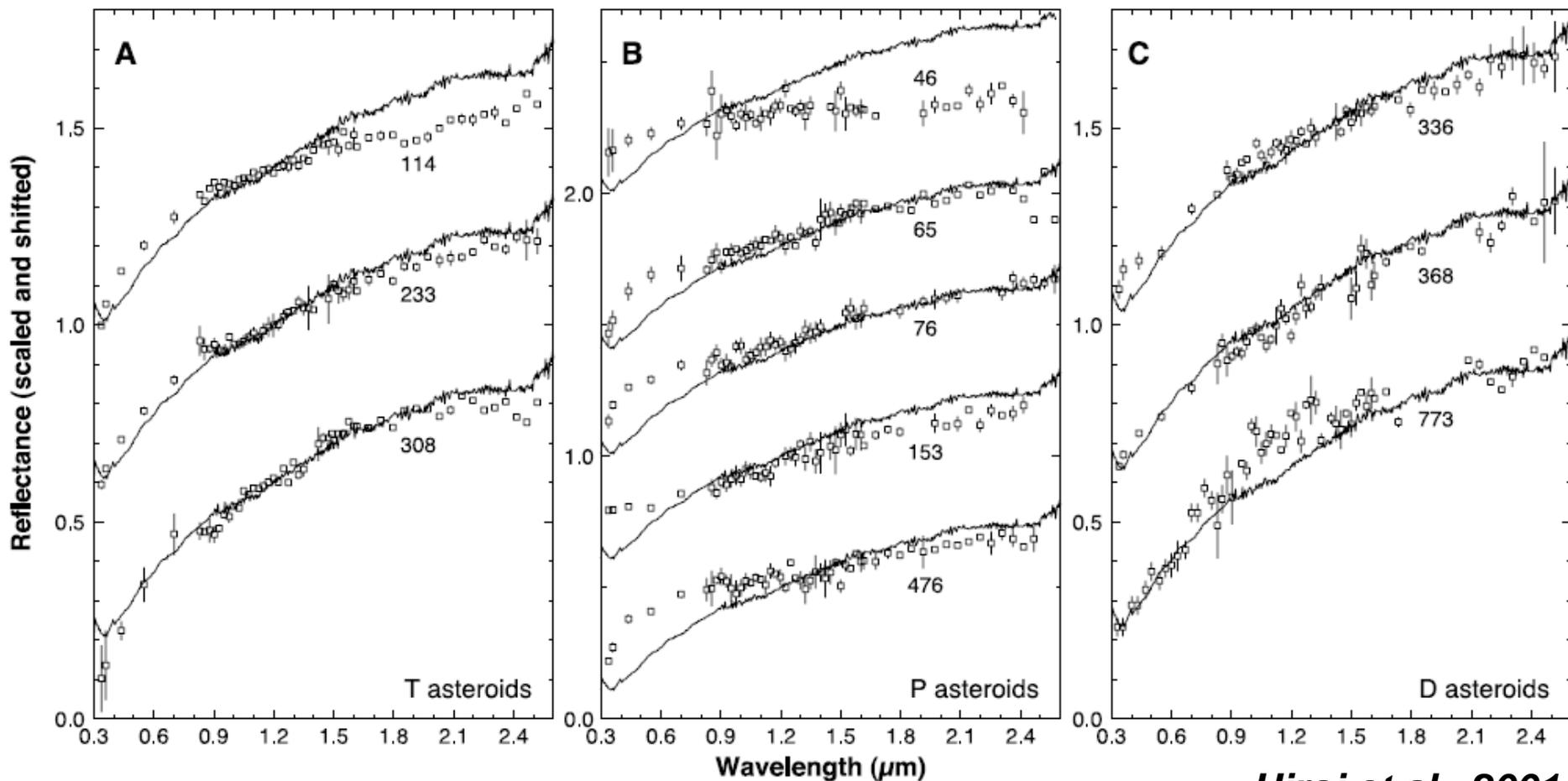
CMコンドライト中の 炭酸塩鉱物の $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ (まとめ)

- 隕石全岩スケールでも、個々の粒子スケールでも大きな変動がある (e.g., Grady et al., 1988; Tyra et al., 2012; Fujiya et al., 2015; Alexander et al., 2015)
- 非常に ^{13}C に富む (最大80‰)
- ^{13}C に富む炭素の起源や、同位体比の変動の要因はよくわかっていない

分析試料・手法

- **Nogoya (CM2.3), LAP 031166 (CM2.1)に含まれる炭酸塩鉱物 (calcite)**
- **Tagish Lake隕石 (C2 ungrouped) に含まれる炭酸塩鉱物 (calcite, dolomite)**
- **二次イオン質量分析計 (SIMS)**
 - **酸素同位体分析 (Nogoya: ims 1280@JAMSTEC高知コア研究所)**
 - **炭素同位体分析 (Nogoya, LAP 031166: NanoSIMS 50@東大大気海洋研)**
 - **炭素同位体分析 (Tagish Lake: NanoSIMS 50@MPI for Chemistry, Mainz)**

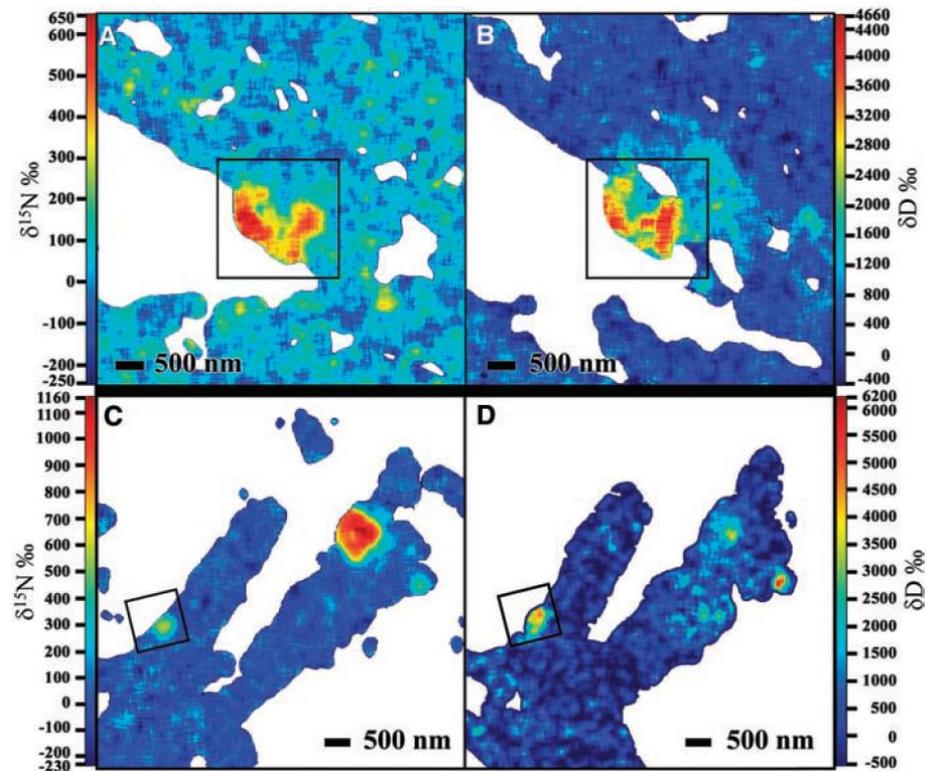
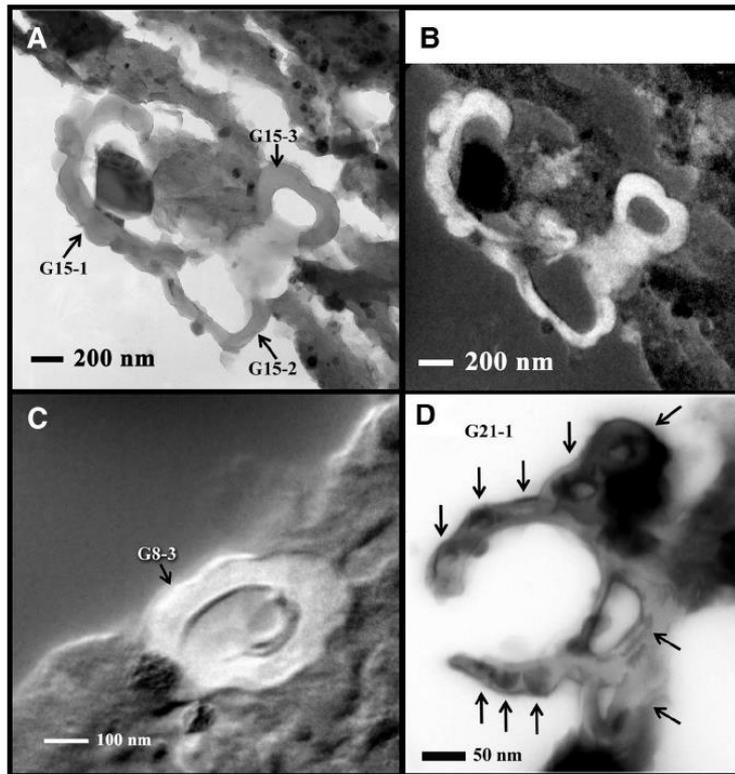
Tagish Lake隕石 (1)



Hiroi et al., 2001

- Tagish Lake隕石の反射スペクトルはD型小惑星に類似
- CMコンドライトはC型小惑星に対応

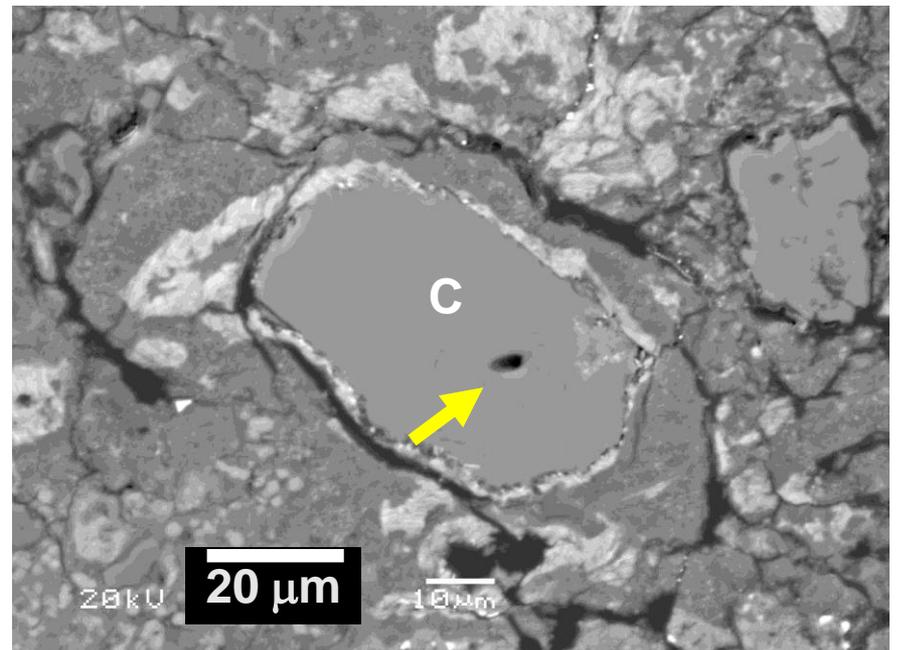
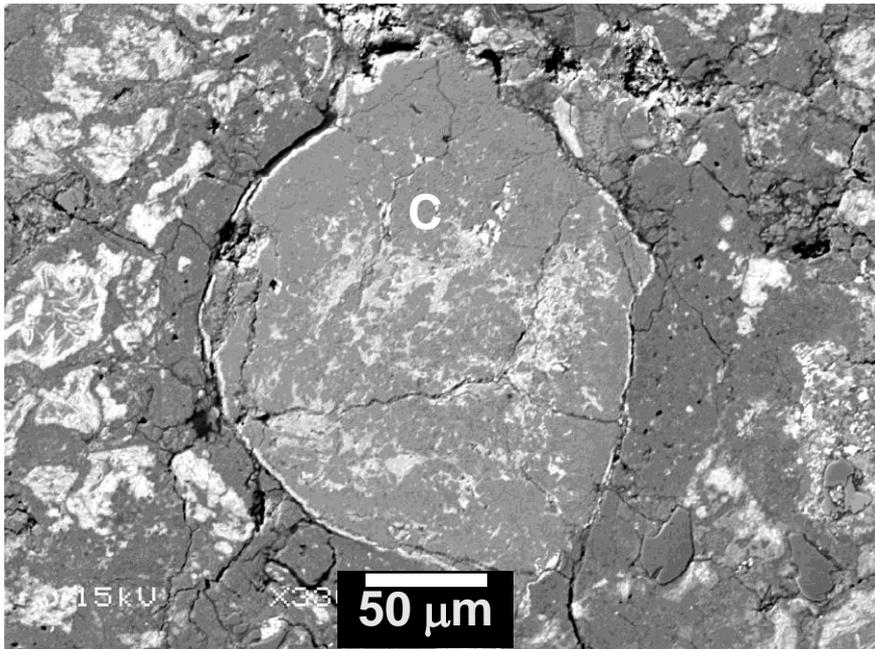
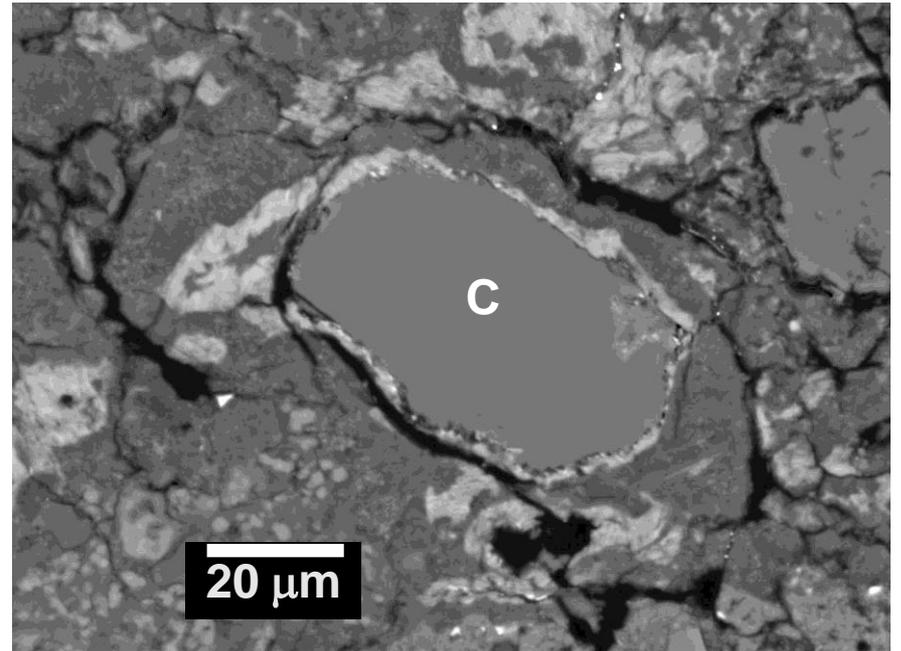
Tagish Lake隕石 (2)



Nakamura-Messenger et al., 2006

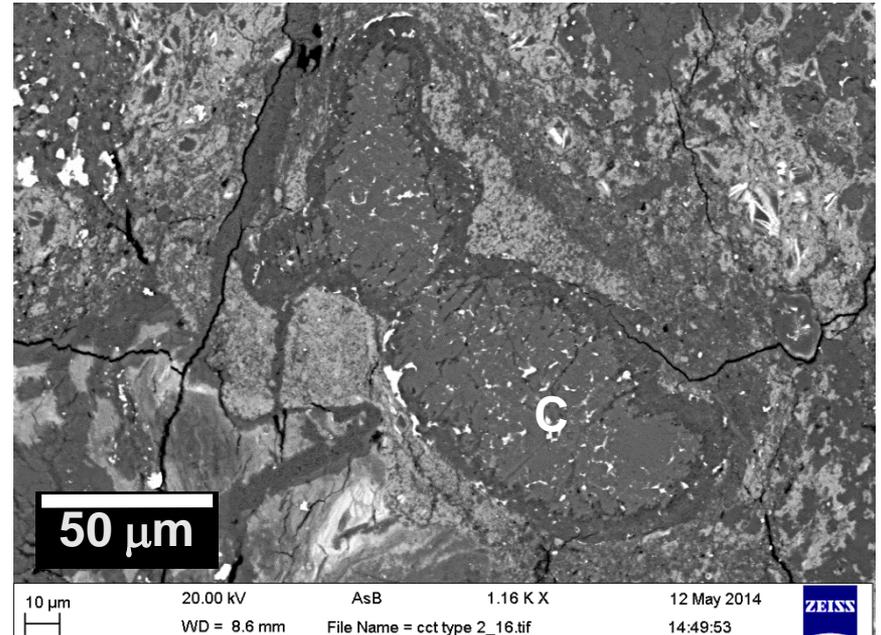
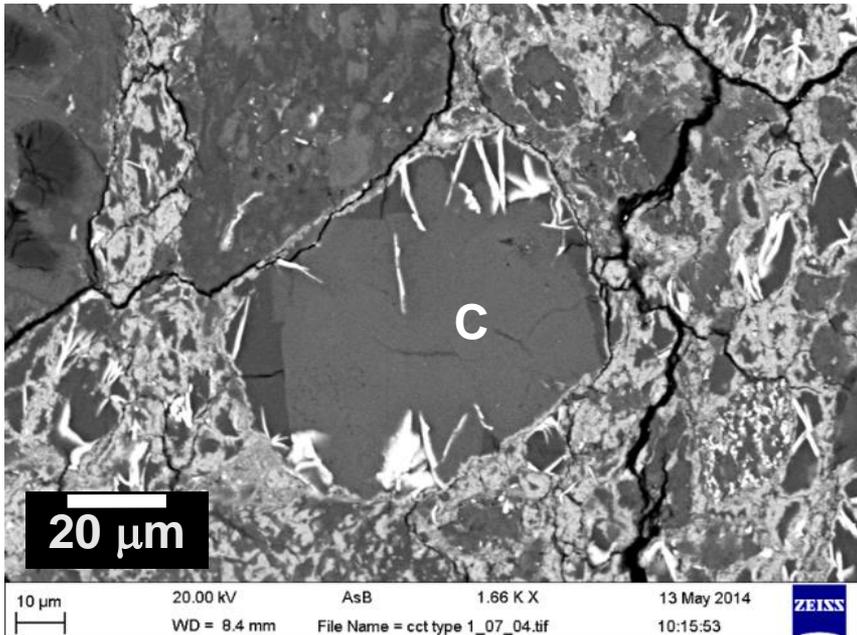
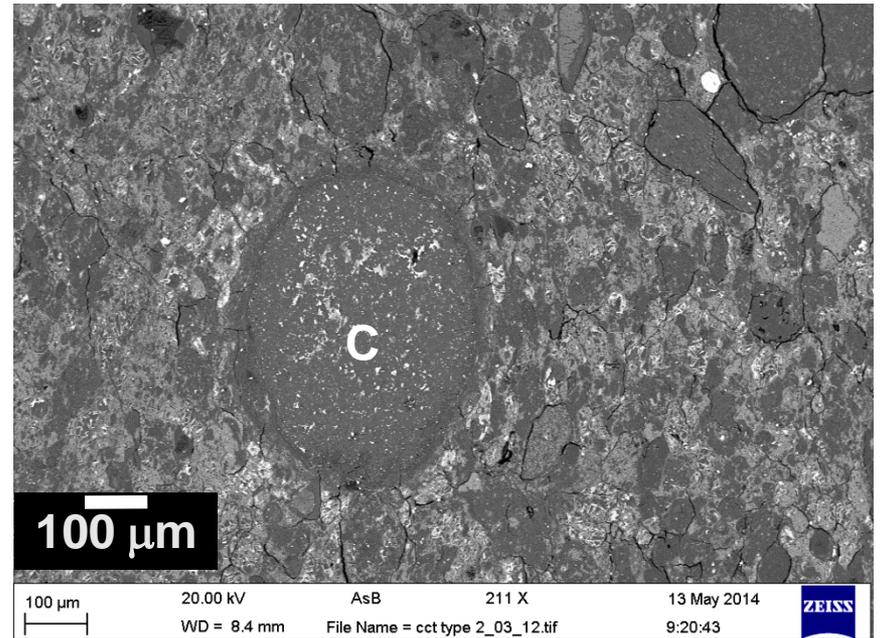
- Organic globule
 - プレソーラー粒子を多く含む
 - 高い空隙率 (~40 %)、低い密度 (~1.6 g/cm³)
- ➔ Tagish Lake隕石は非常に始原的で特異な隕石

Nogoya calcite

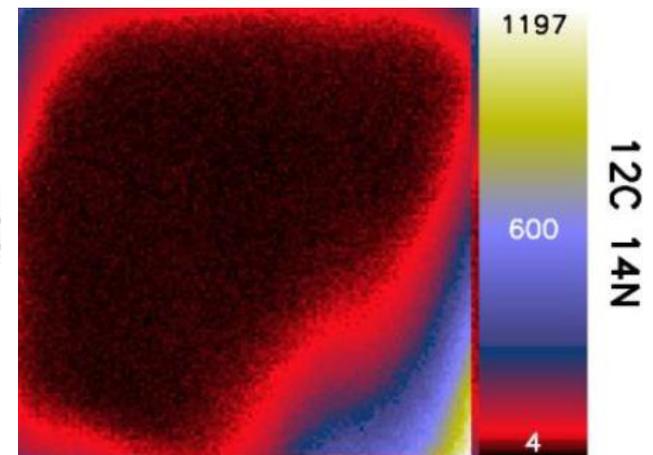
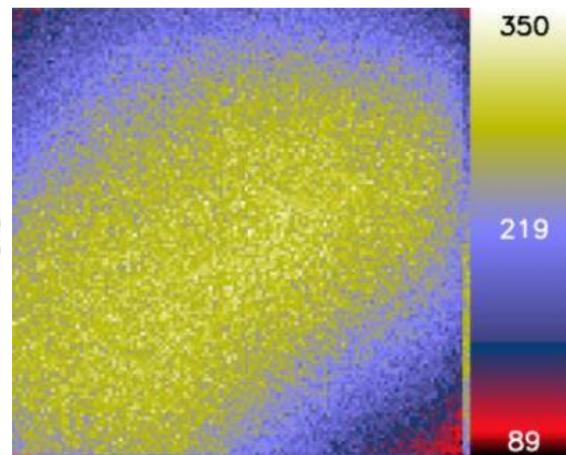
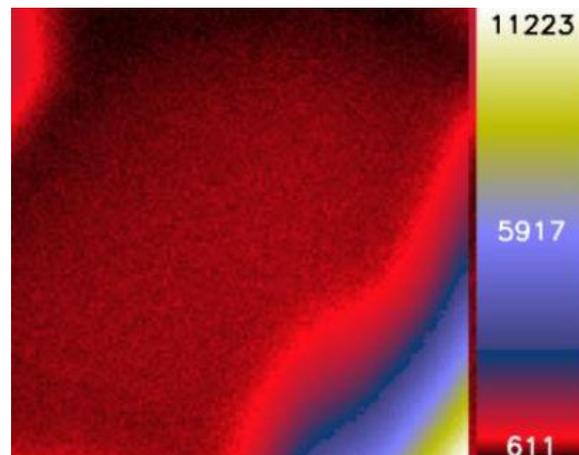
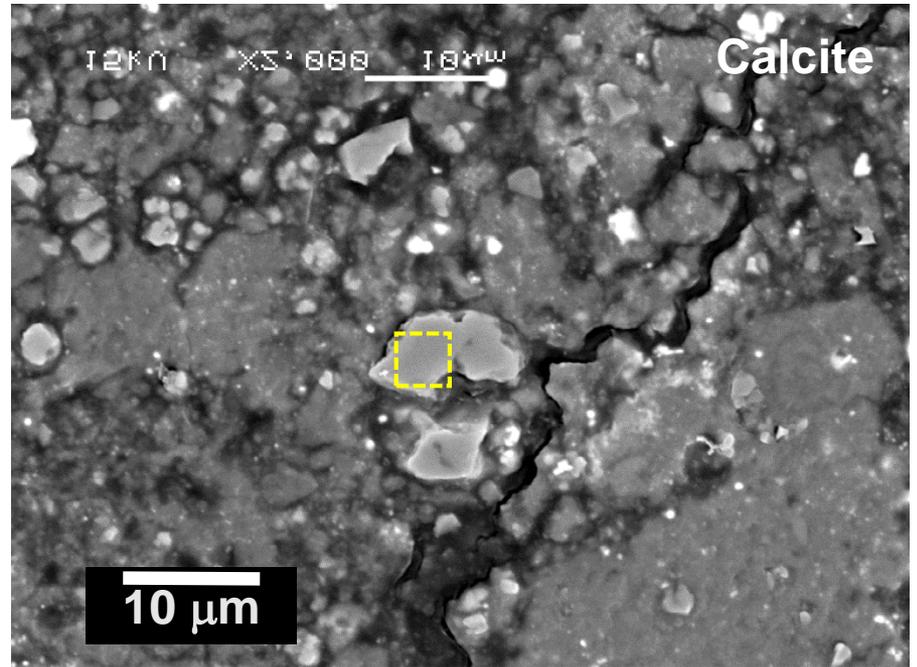


LAP 031166

calcite

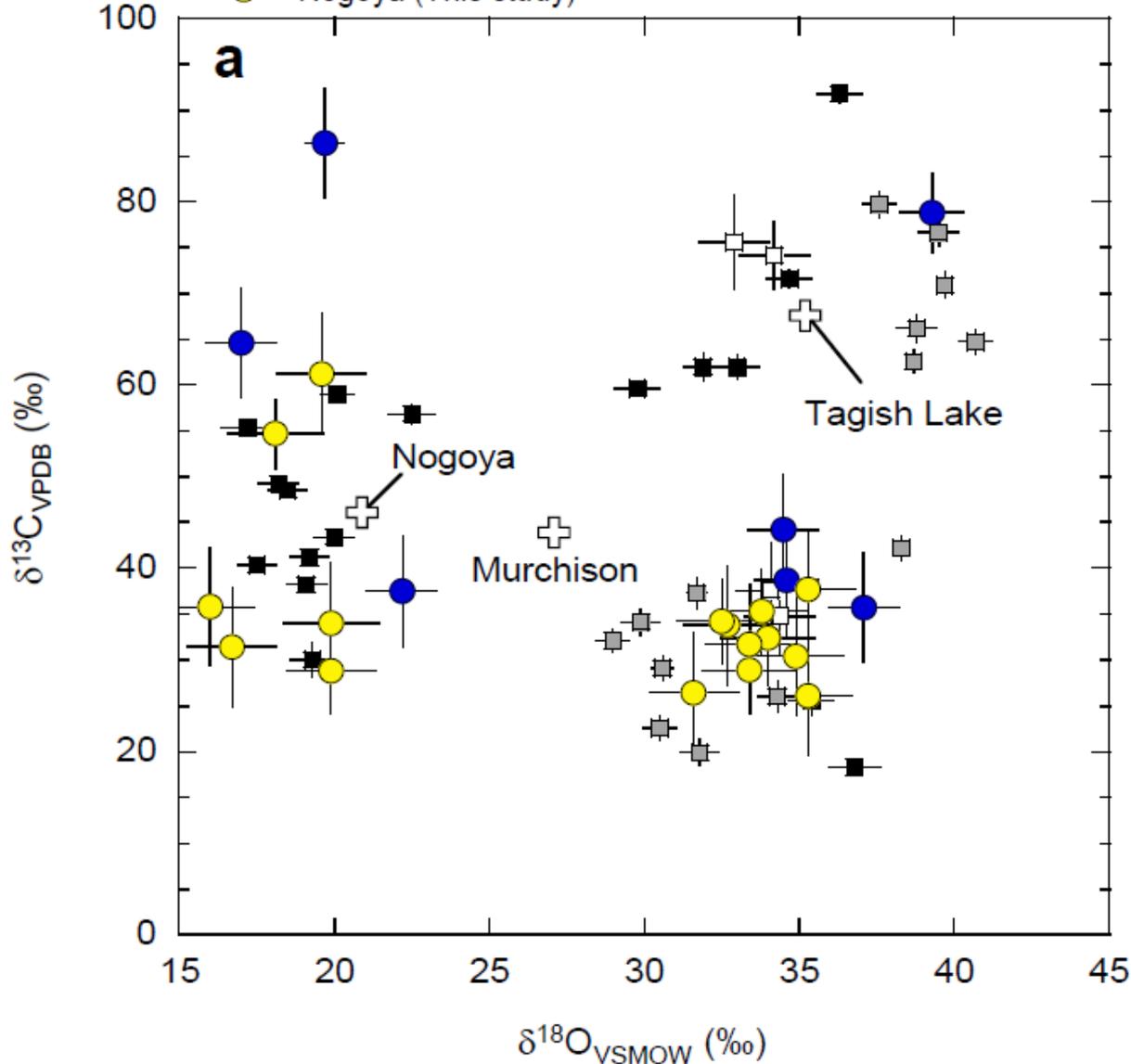


Tagish Lake calcite



結果 (CMコンドライト)

- ⊕ Whole-rock
- Murchison
- ▣ Paris
- Boriskino
- LAP 031166 (This study)
- Nogoya (This study)



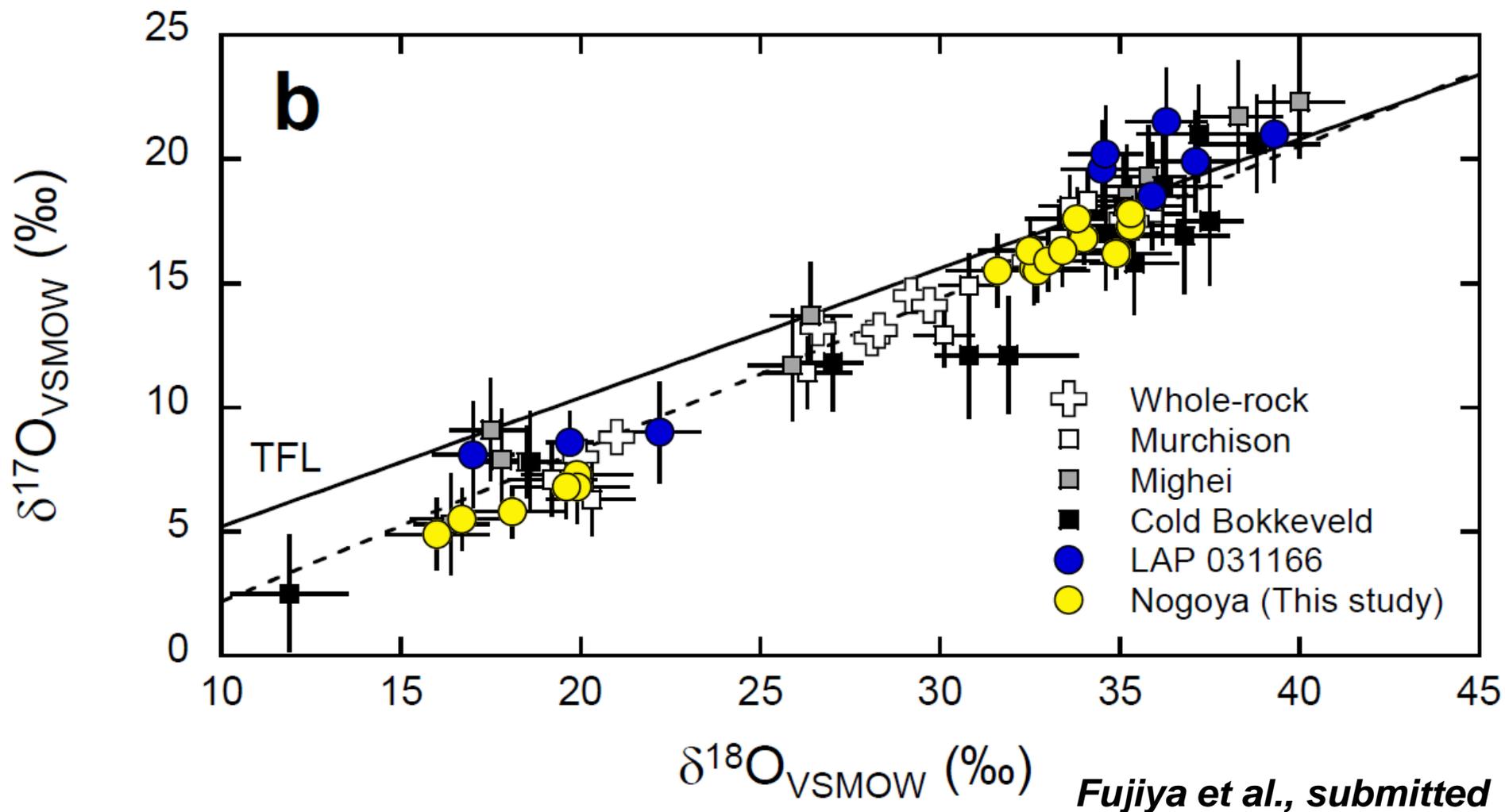
- $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{18}\text{O}$ の間に相関はない

- $\delta^{13}\text{C}$ の変動幅は20-80‰

- 炭酸塩鉱物中の炭素：0.03-0.6 (平均0.17) wt%

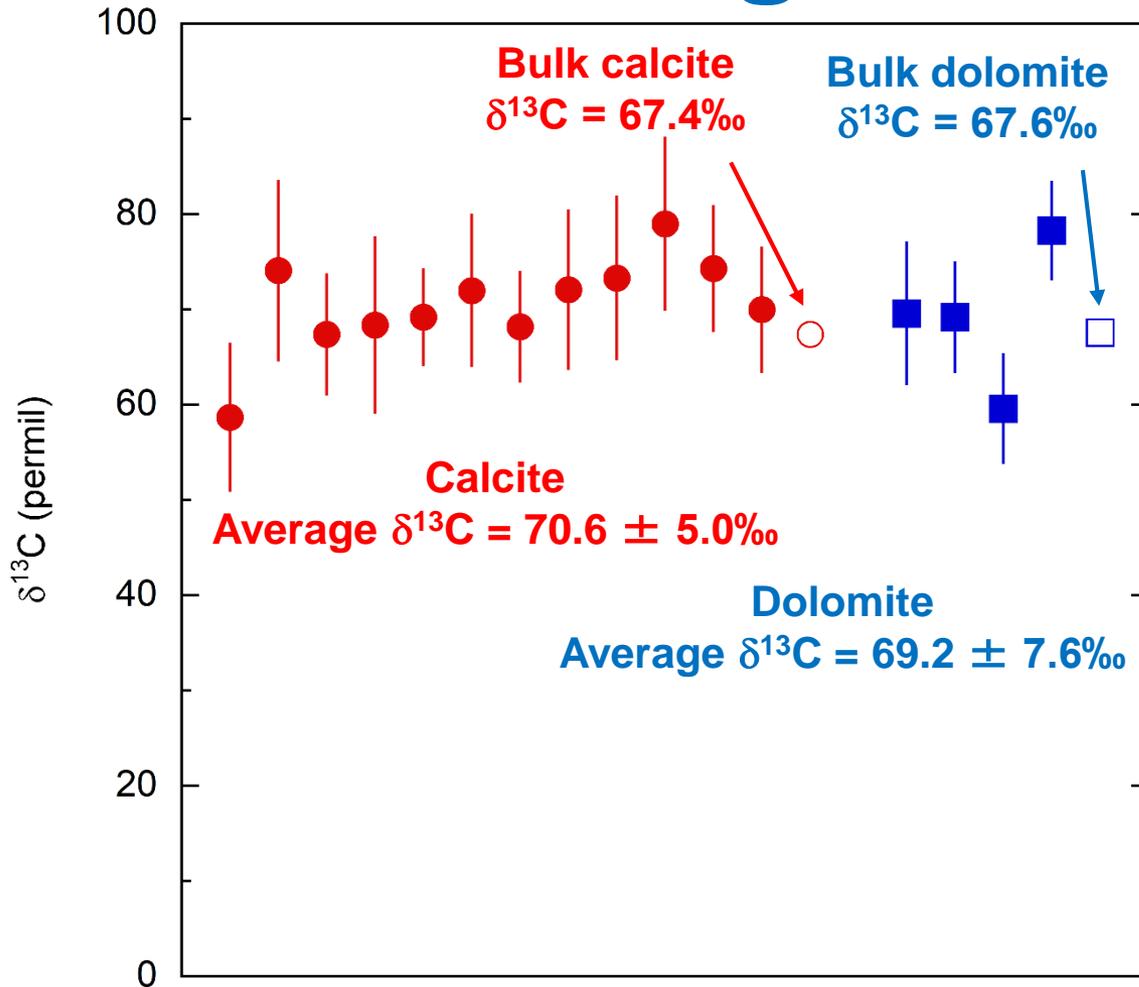
Fujiya et al., submitted

結果 (CMコンドライト)



- 炭酸塩鉱物の同位体比は一直線上にプロットされる
- 同位体比は水-岩石間の同位体交換&形成温度の差異を反映

結果 (Tagish Lake隕石)

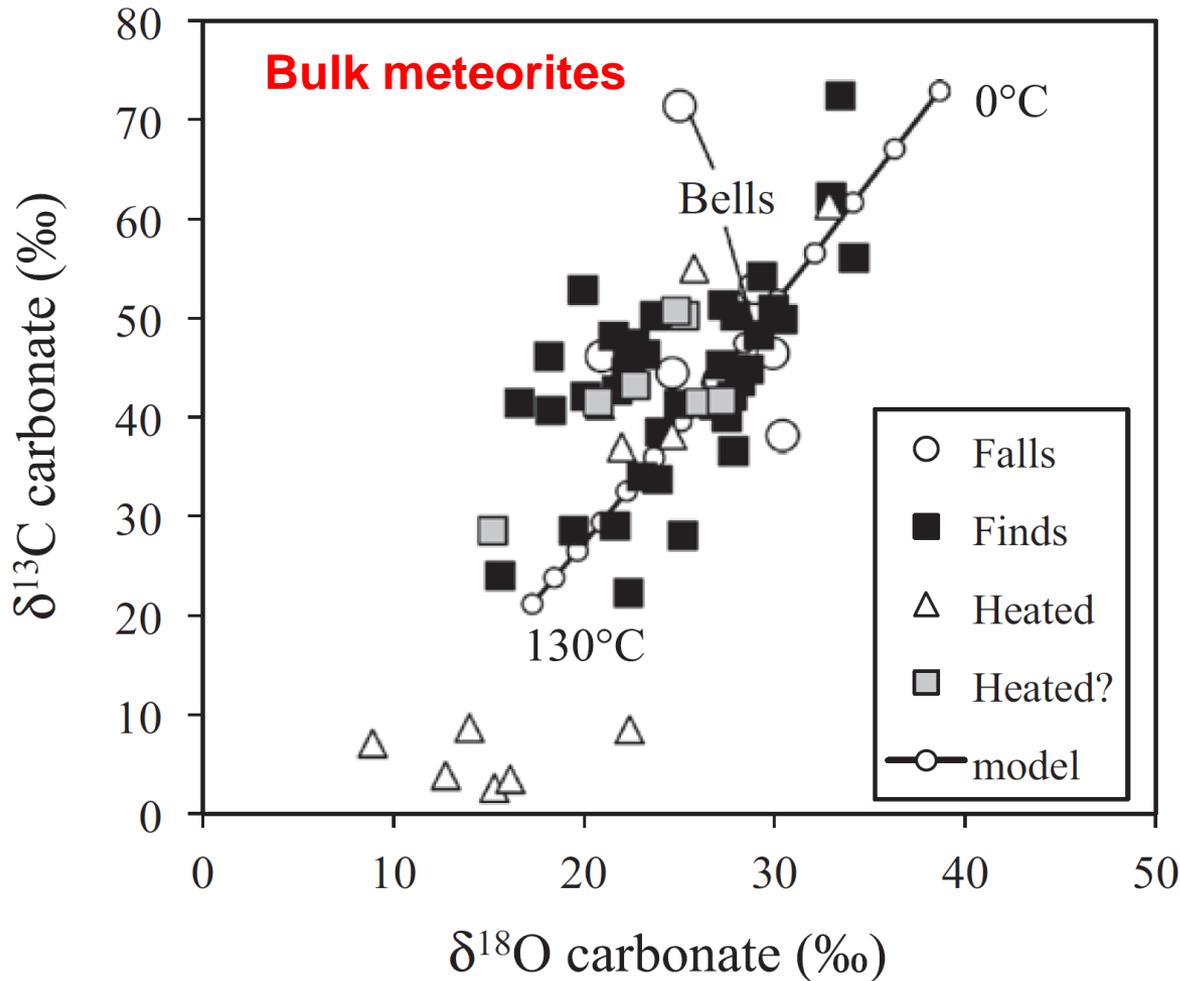


Modified from Fujiya et al., submitted

Bulk carbonate data from Grady et al., 2002

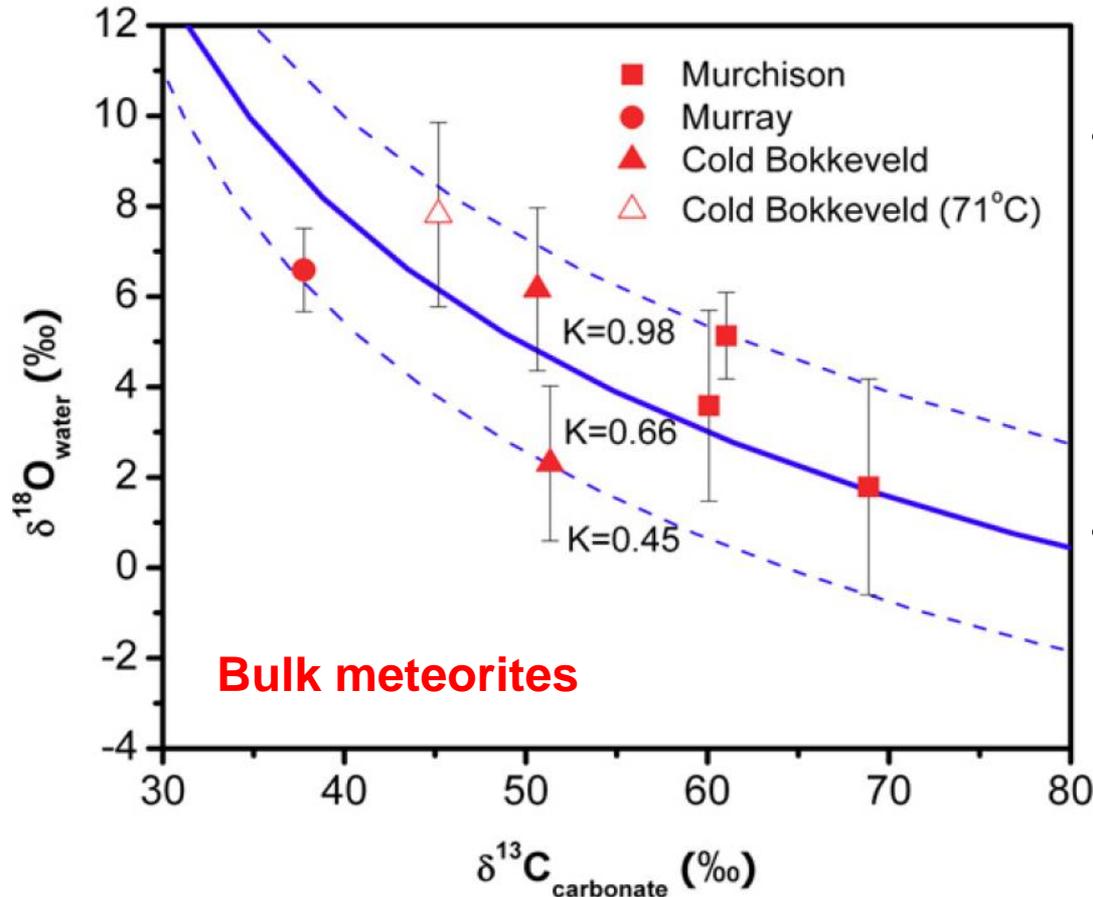
- 均質で高い $\delta^{13}\text{C}$ 値を示す
- 炭酸塩鉱物中の炭素：~1.3 wt%

炭素同位体比の変動（1）

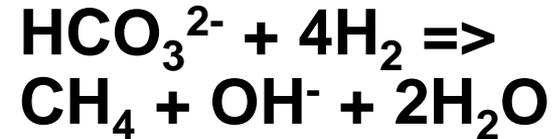


- CO (or CH₄) (炭素) およびH₂O (酸素) と CaCO₃との間の同位体分別？
- $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{18}\text{O}$ の間に相関がないことと矛盾

炭素同位体比の変動（2）

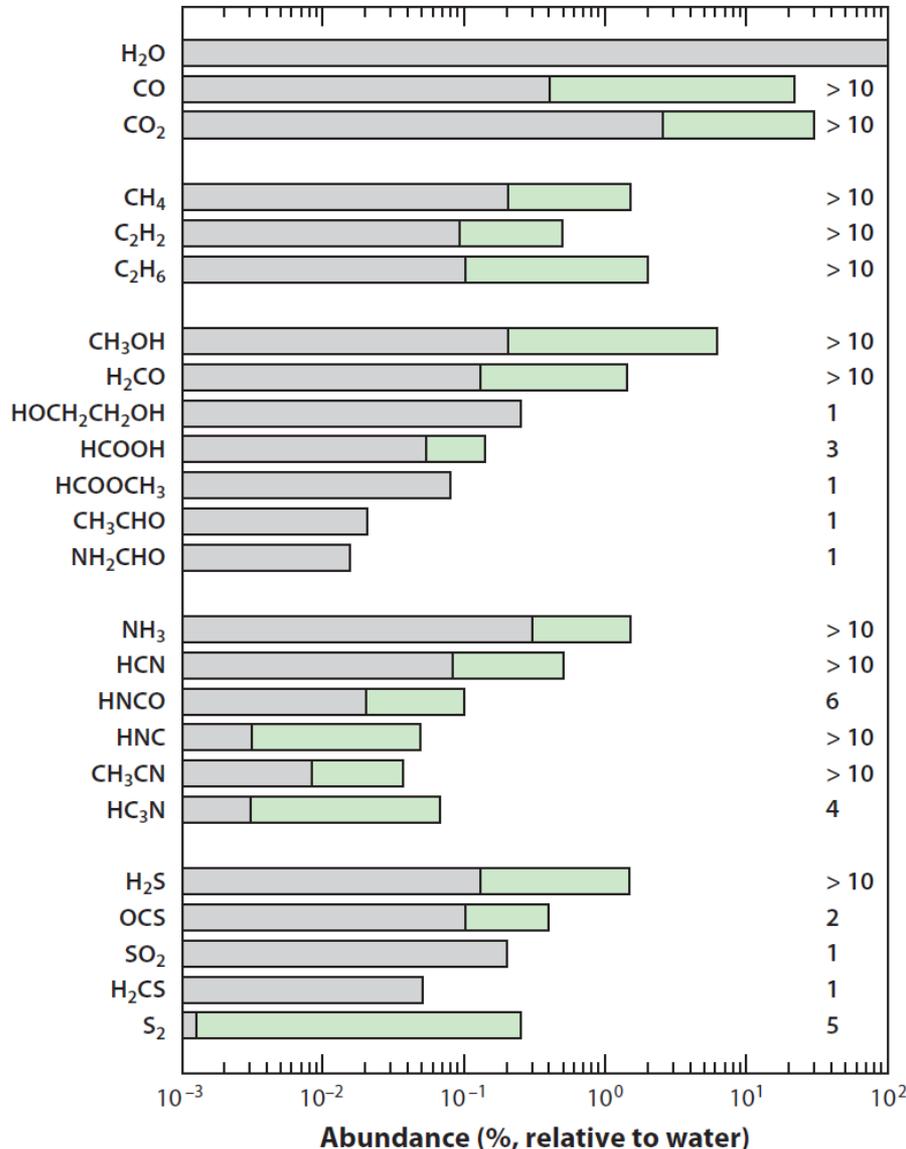


- ^{13}C に乏しい CH_4 の発生と散逸（レイリー過程）？



- $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{18}\text{O}$ の間に相関がないことと矛盾

炭素同位体比の変動（3）



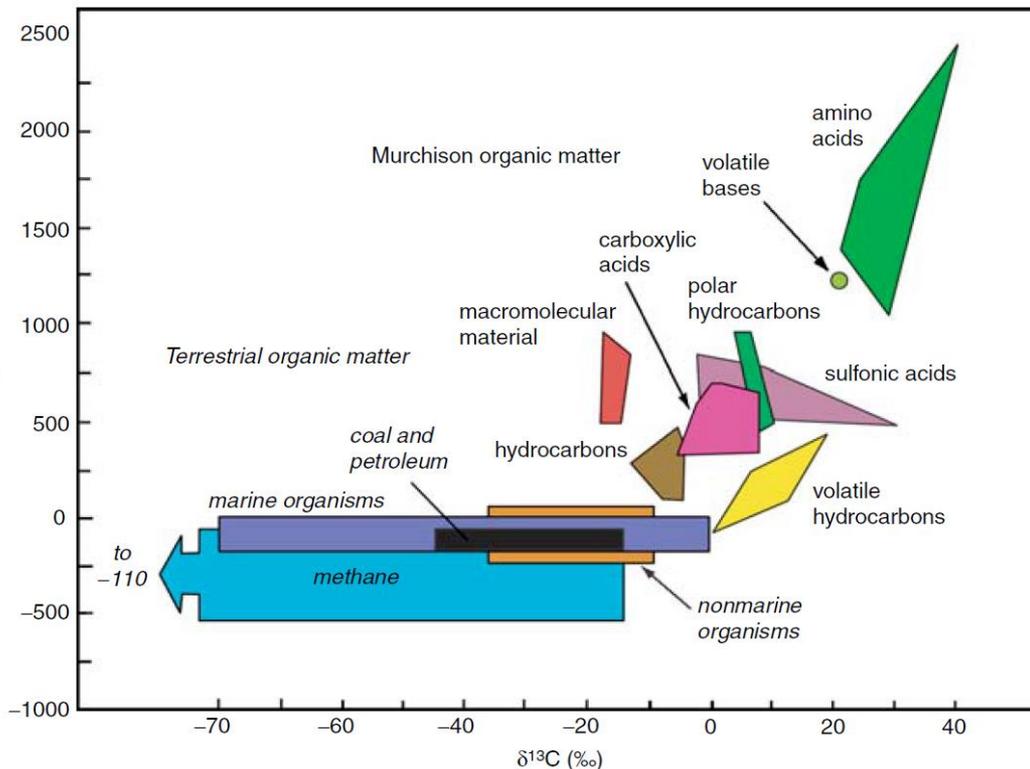
- $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{18}\text{O}$ に相関はない

➔ 炭素と酸素同位体比の変動は独立

- $\delta^{13}\text{C} < 20\text{‰}$ と $\delta^{13}\text{C} > 80\text{‰}$ の炭素リザーバのミキシングを考える

- そのようなリザーバの候補は
 - ✓ CO₂ ice
 - ✓ CO ice
 - ✓ 有機物

炭素リザーバ（１）：有機物



Sephton & Botta, 2005

- CMコンドライト中の有機物： $\delta^{13}\text{C} < 60\text{‰}$ (Aponte et al., 2015)

- 炭酸塩鉱物形成のためには有機物を酸化する必要がある

➔ 過酸化物などの酸化剤

- 有機物を酸化して発生する CO_2 は $\sim 0.1 \text{ wt}\%$ (Cody and Alexander, 2005; Alexander et al., 2015)

↔ Tagish Lake中の炭酸塩鉱物： $\sim 1.3 \text{ wt}\%$ (Grady et al., 2002)

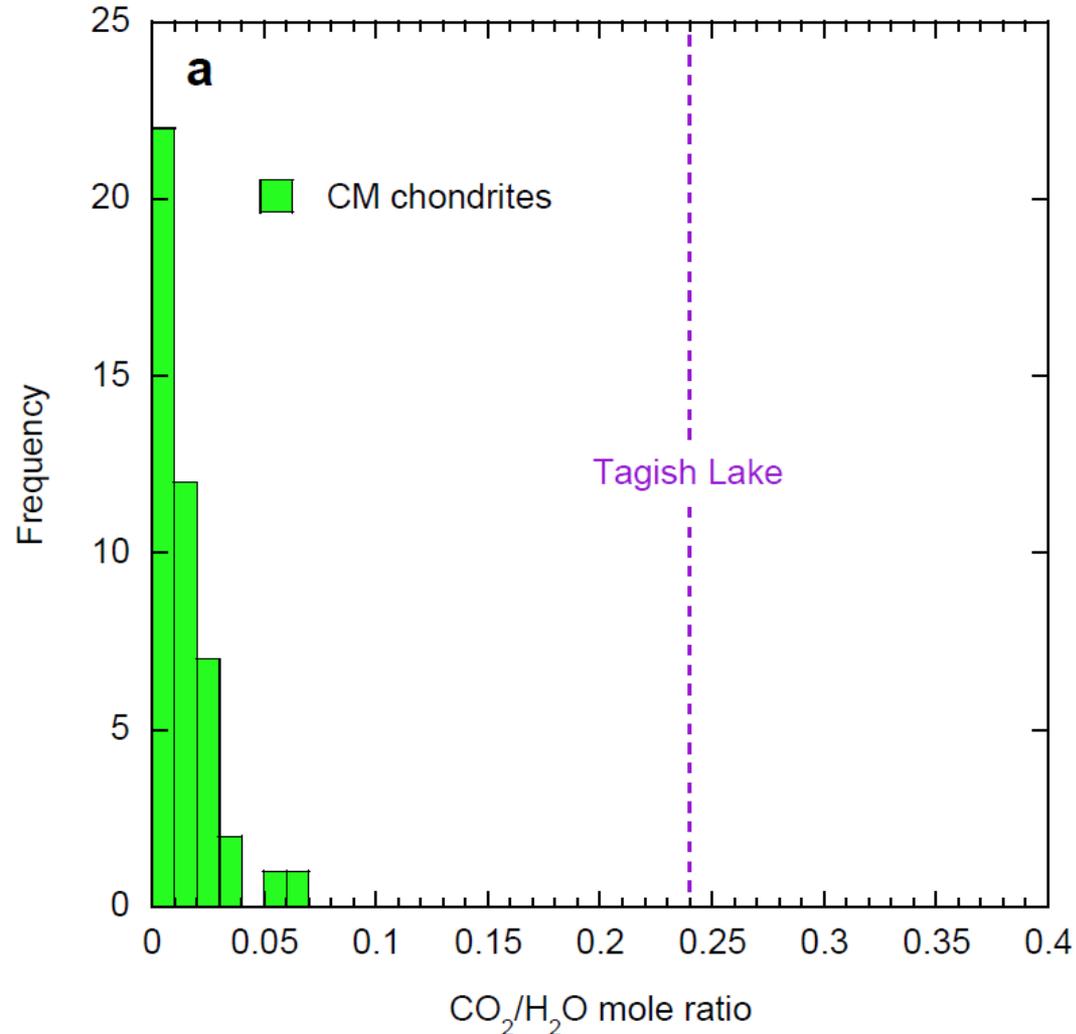
炭素リザーバ（２）：無機氷

- ロゼッタ探査機による67P/Churyumov-Gerasimenko彗星に含まれるCO₂：
 $\delta^{13}\text{C} \sim 65 \pm 51\text{‰}$ (Hässig et al., 2017)
- Murchison隕石中のCO：
 $\delta^{13}\text{C} \sim -32 \pm 2\text{‰}$ (Yuen et al., 1984)
- $\delta^{13}\text{C} > 80\text{‰}$ の炭素リザーバはCO₂ ice
- $\delta^{13}\text{C} < 20\text{‰}$ の炭素リザーバはよくわからない（おそらく有機物）

炭酸塩鉱物の炭素の起源

- CO₂ ice ($\delta^{13}\text{C} \sim 80\text{‰}$)と有機物($\delta^{13}\text{C} \sim 20\text{‰}$)由来の炭素のミキシング
- 炭酸塩鉱物の $\delta^{13}\text{C}$ 値からCO₂ ice由来の炭素の割合をマスバランス計算
 - CMコンドライト中の炭酸塩鉱物の炭素（平均 $\delta^{13}\text{C} \sim 45\text{‰}$, 0.17 wt%）の~42%がCO₂ ice由来
 - Tagish Lake中の炭酸塩鉱物の炭素（平均 $\delta^{13}\text{C} \sim 68\text{‰}$, 1.3 wt%）の~80%がCO₂ ice由来

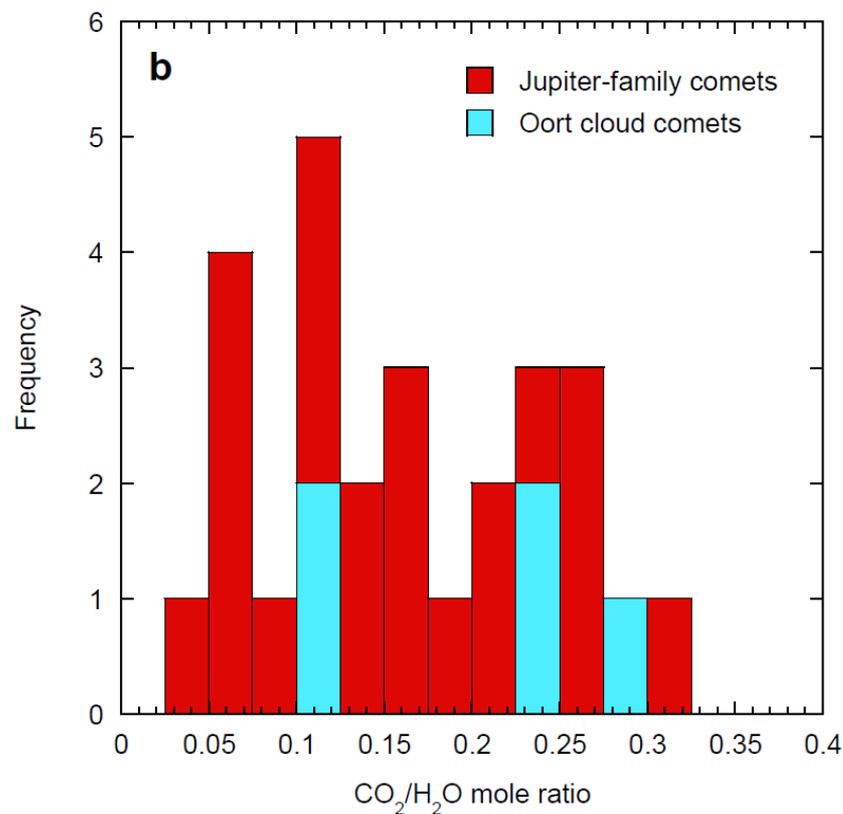
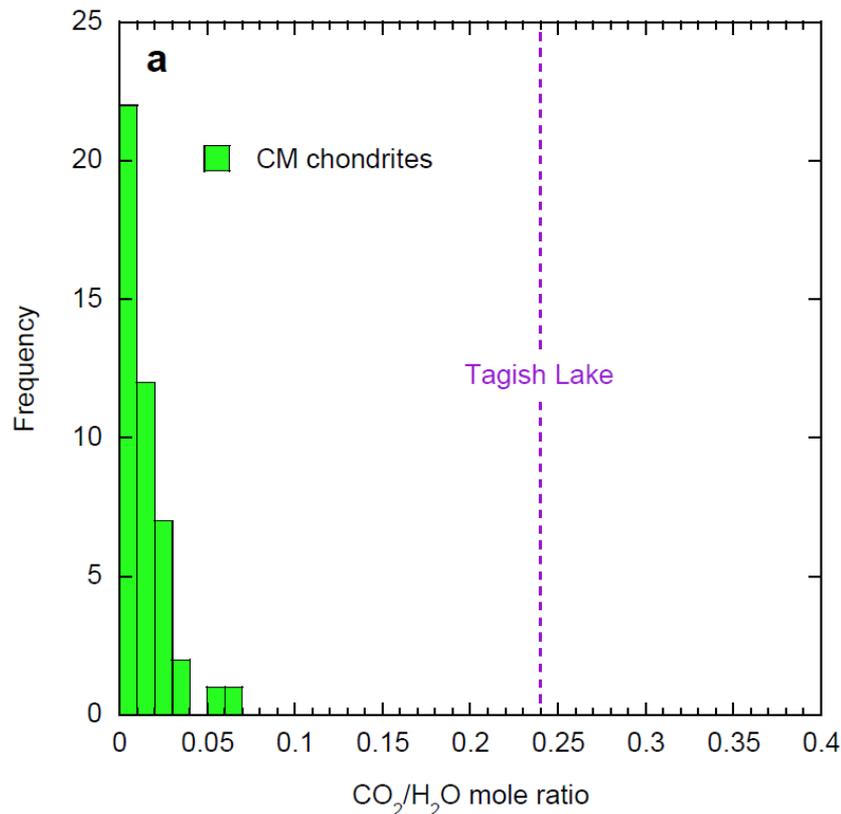
CMコンドライトとTagish Lake 母天体に集積した氷のCO₂/H₂O



- H₂O存在量は含水鉱物のH存在量から推定
(Alexander et al., 2013)
- Tagish Lake氷はCM氷よりCO₂に富む

Fujiya et al., submitted

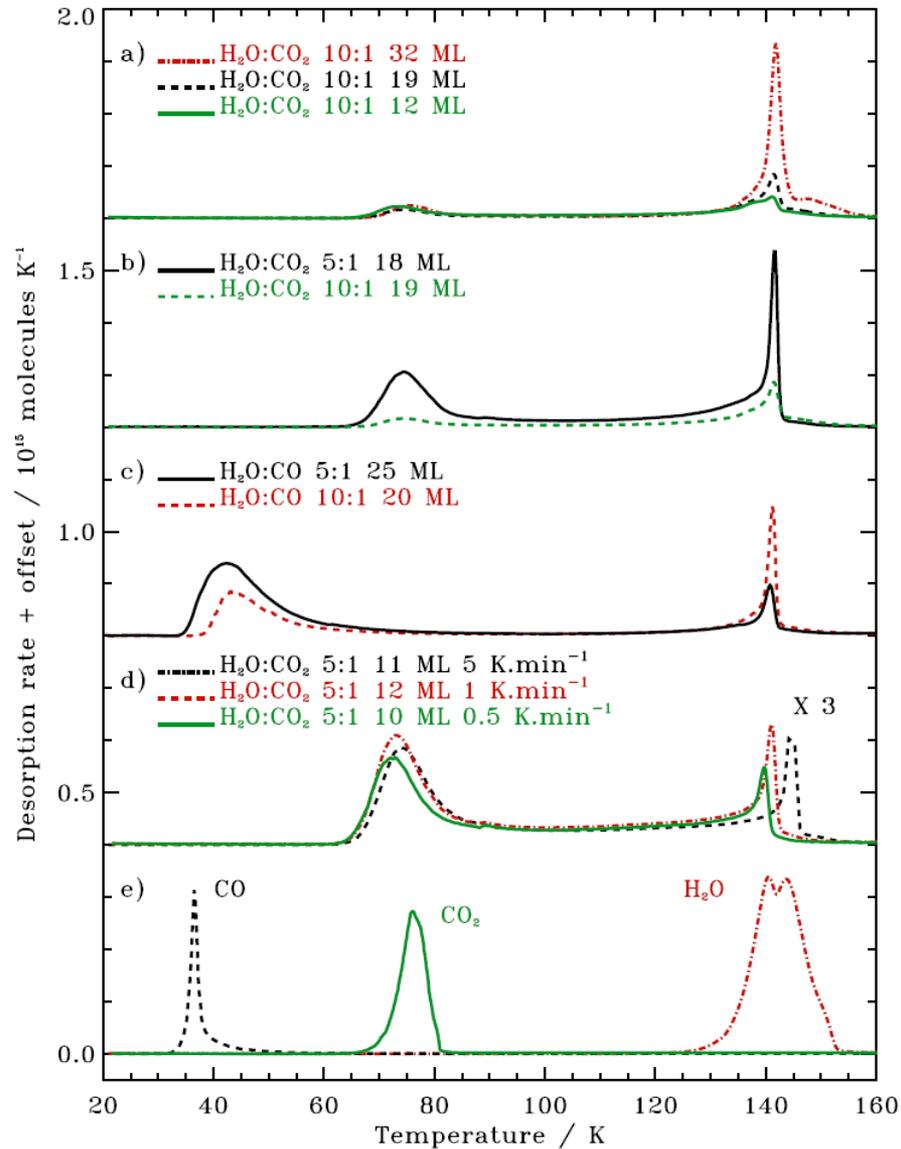
コンドライト氷と彗星氷との比較



Comet data from Ootsubo et al., 2012

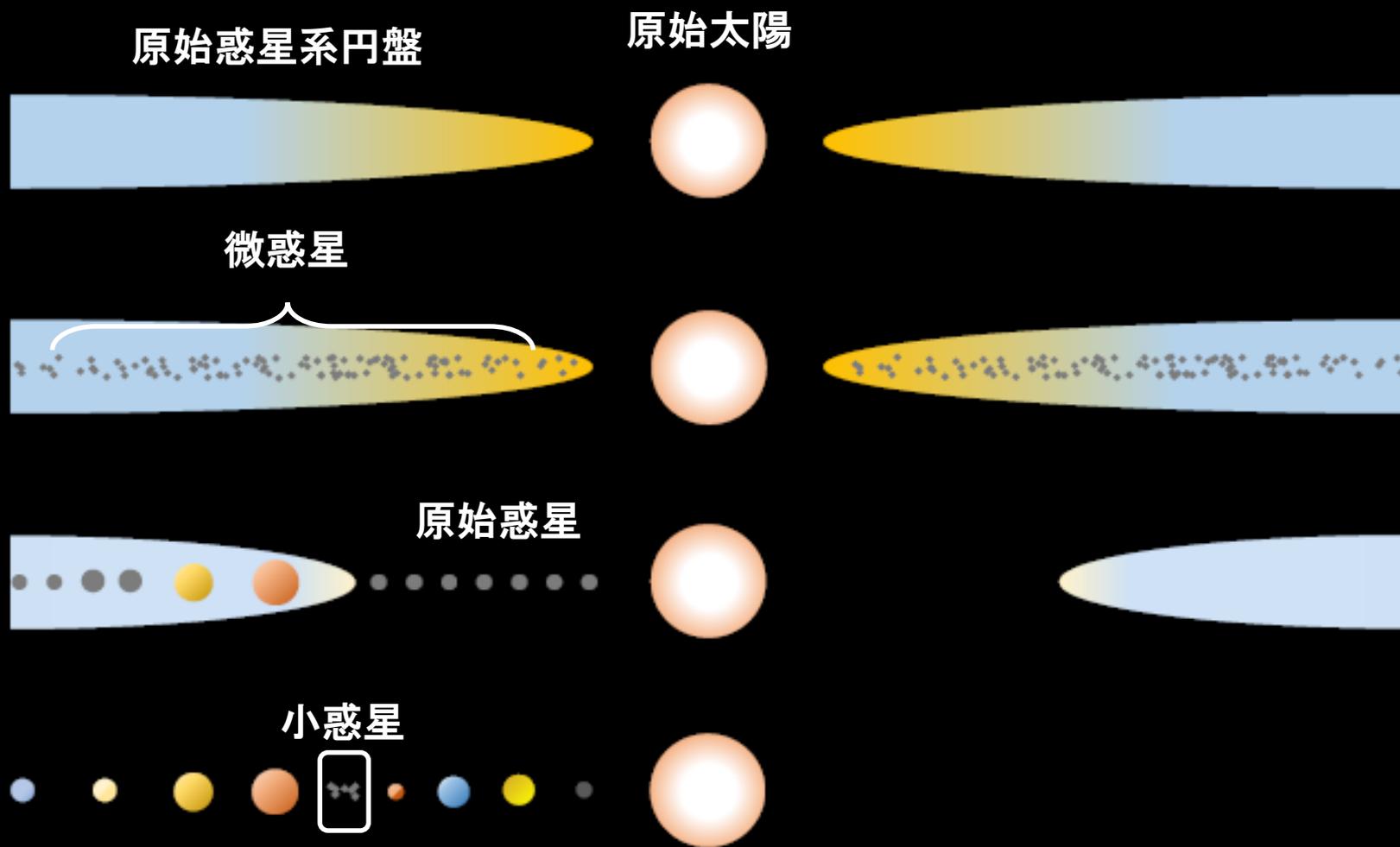
- Tagish Lake氷のCO₂/H₂O比は彗星氷に近い
- Tagish Lake母天体（D型小惑星）はCO₂が凝縮する低温（<80 K; Fayolle et al., 2011）、CO₂ snow line以遠（>10 AU; Okuzumi et al., 2016）で形成

H₂O-CO₂-CO氷の昇華

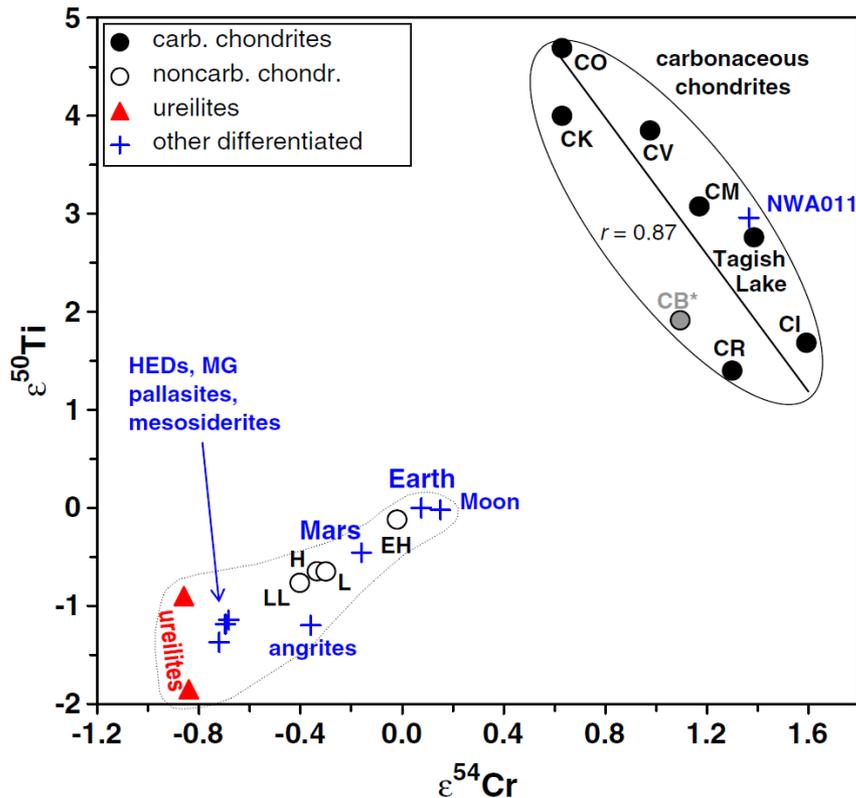


Fayolle et al. 2011

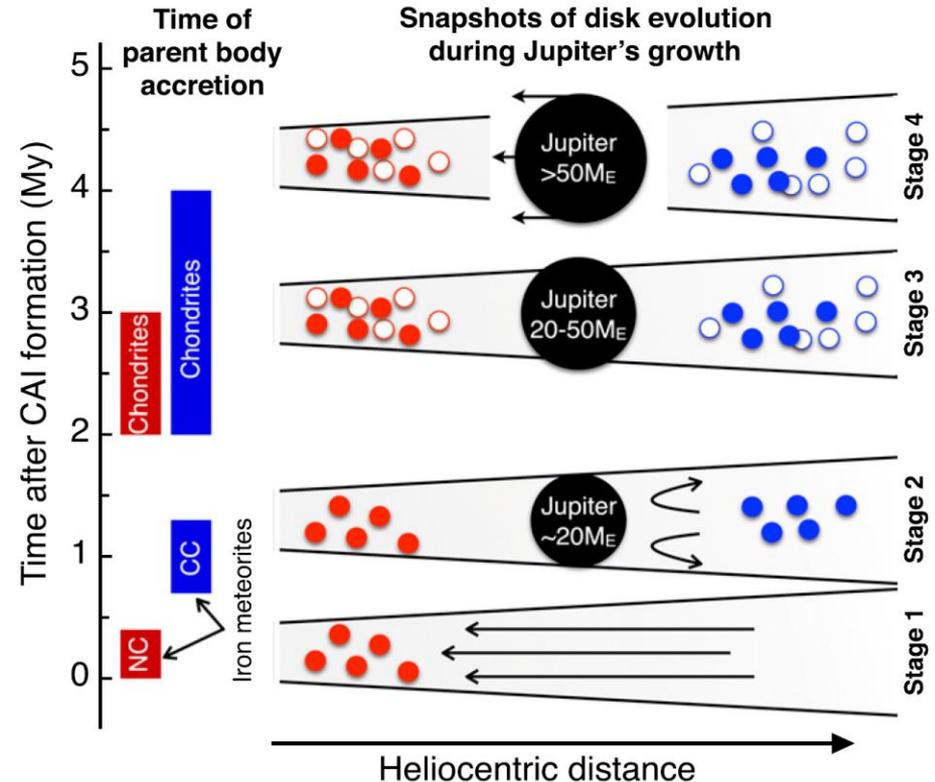
(古典的) 惑星形成シナリオ



隕石全岩の同位体異常



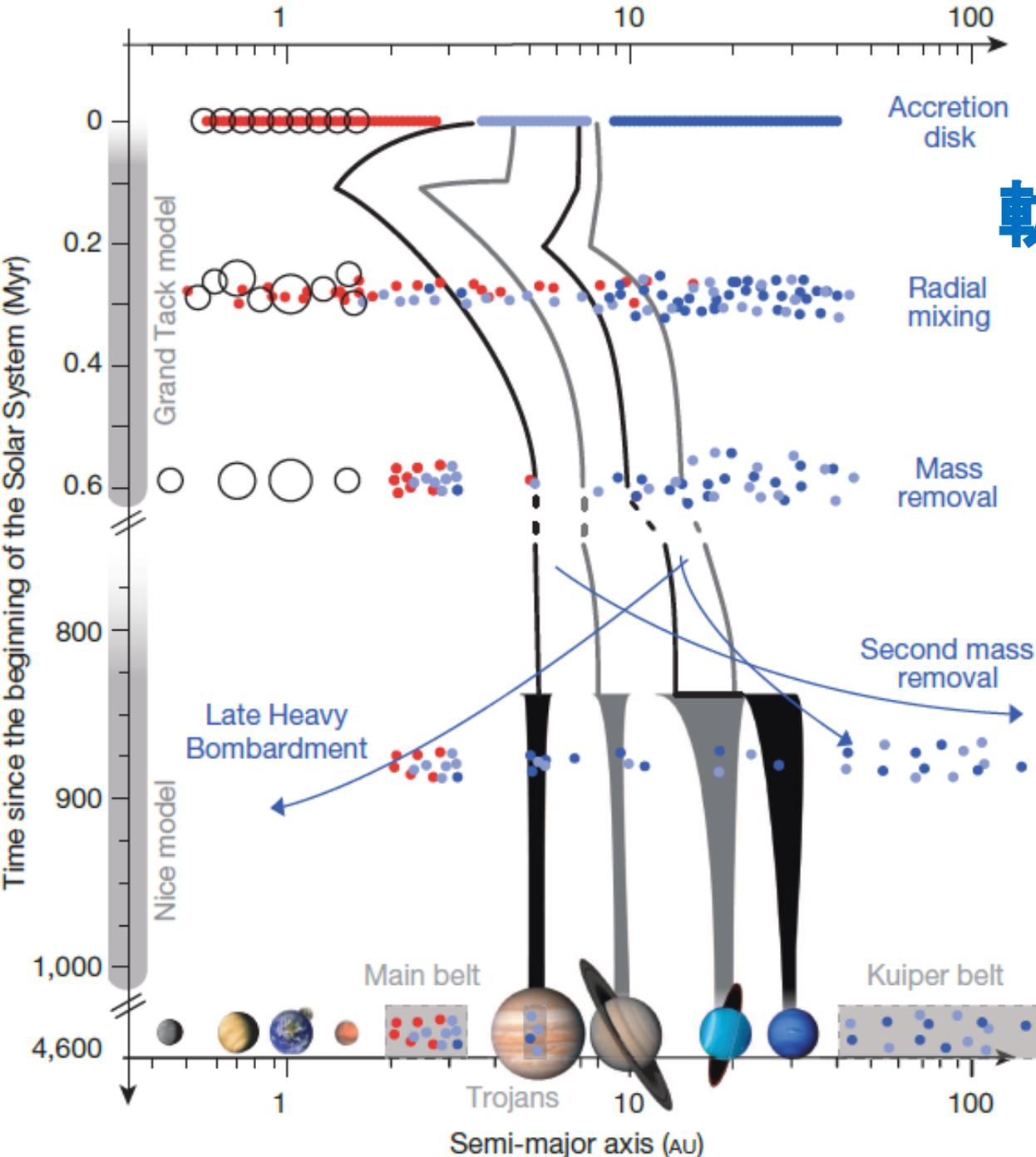
Warren, 2011



Kruijer et al., 2017

- 炭素質コンドライトとそれ以外の隕石のリザーバは木星によって空間的に隔てられていた？

巨大ガス惑星の軌道進化と小惑星



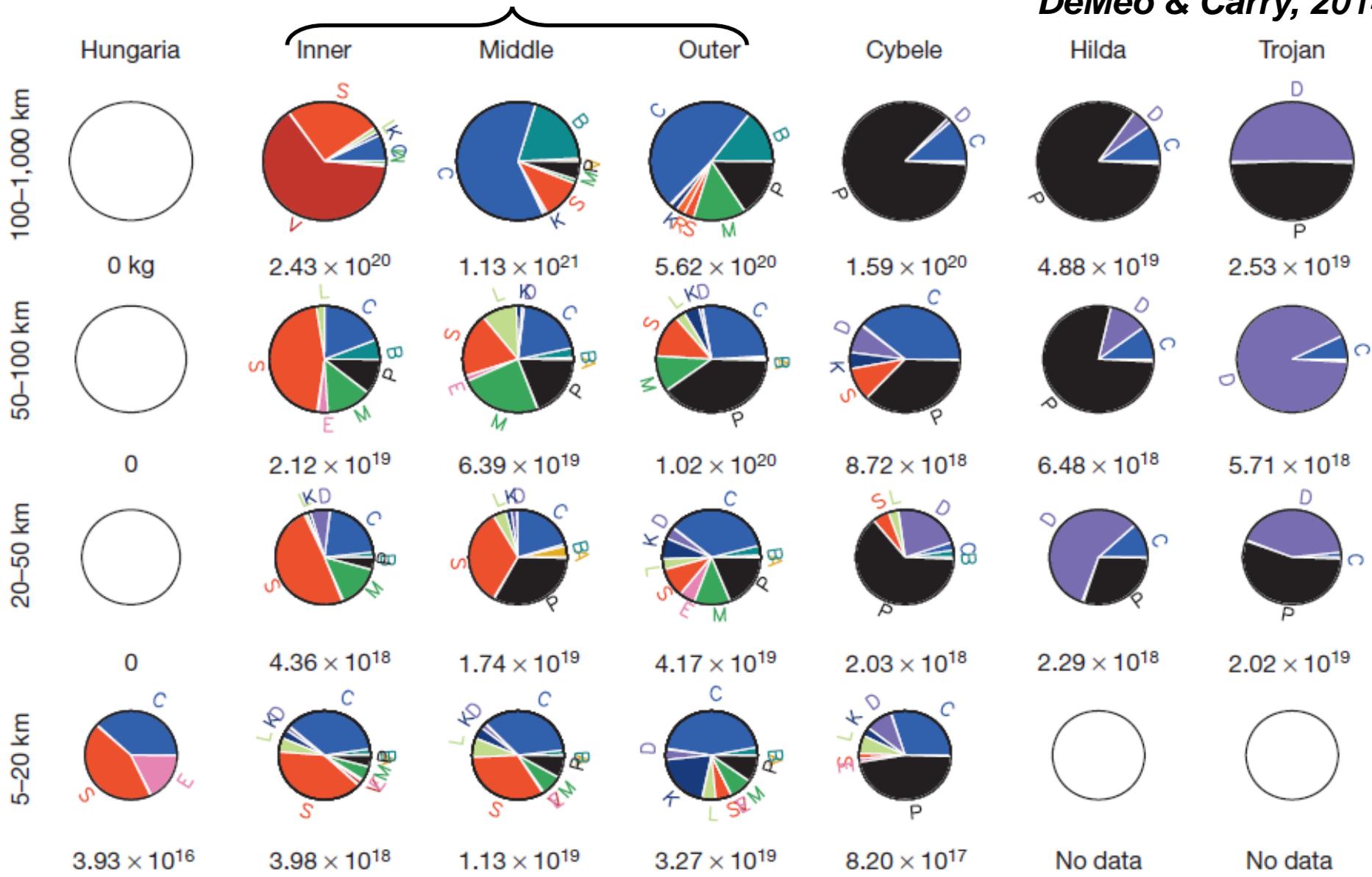
- 惑星の軌道進化による小天体の散乱

DeMeo & Carry, 2014

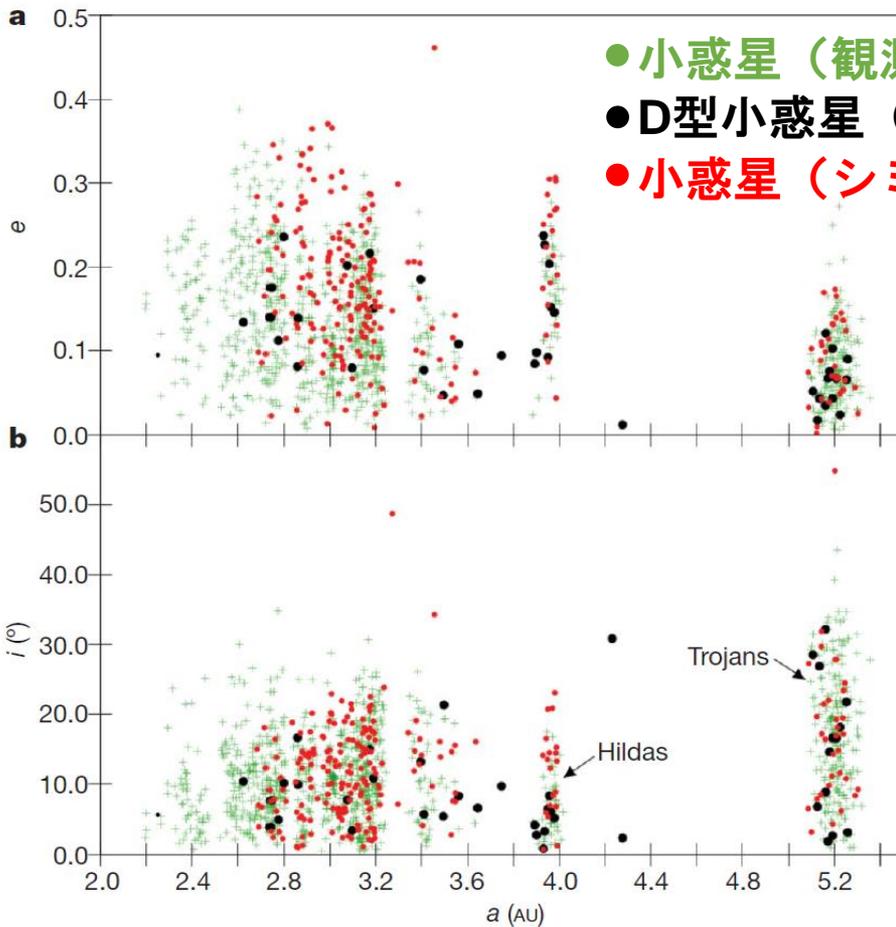
小惑星のタイプと割合

メインベルト

DeMeo & Carry, 2014

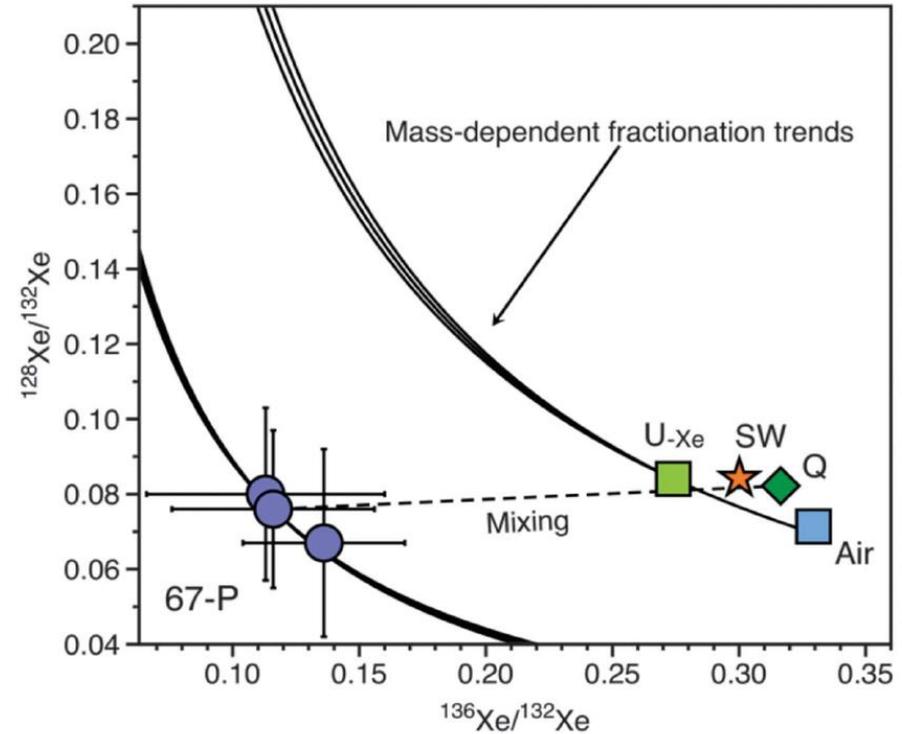
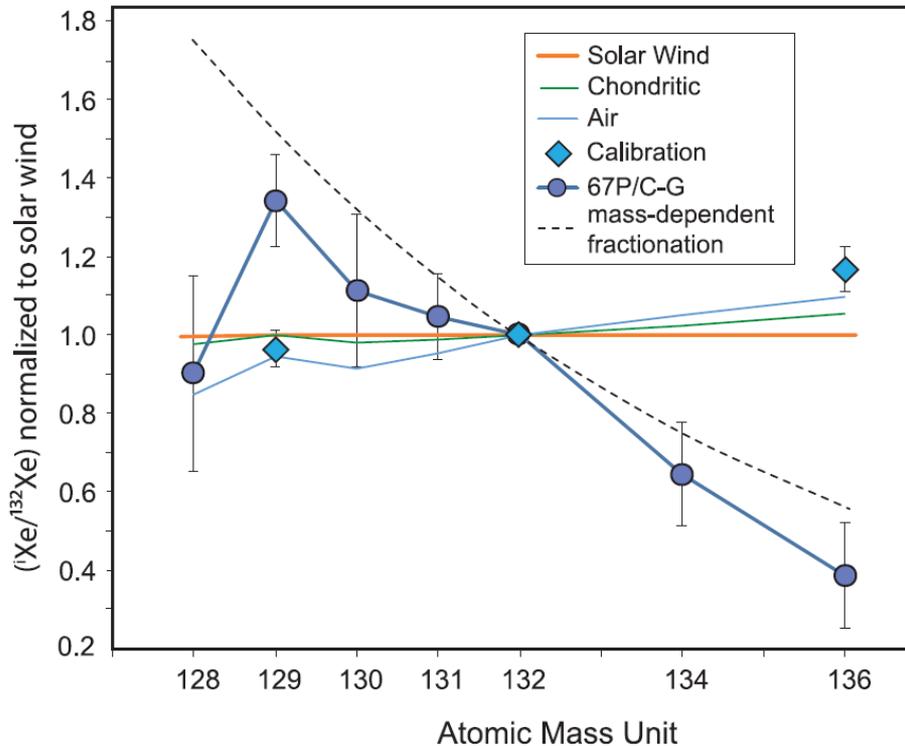


Nice modelと メインベルト小惑星



- Nice modelでは、惑星の軌道不安定によって多くの太陽系外縁の微惑星がouter main beltに輸送される
(Levison et al., 2009; Vokrouhlický et al., 2016)

彗星と地球型惑星の揮発性物質



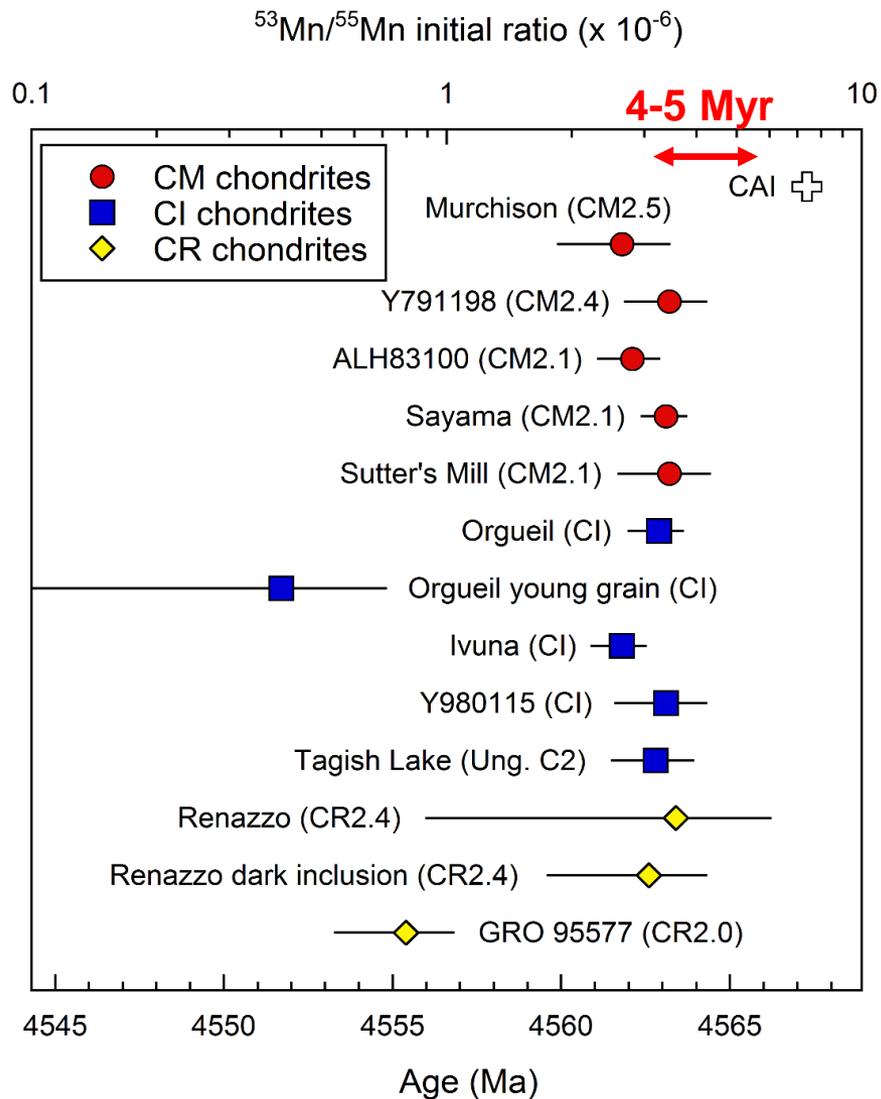
Marty et al., 2017

- Rosettaによる67P/C-G彗星の観測
- 地球大気中のXe同位体比は、コンドライト (or 太陽) Xeと~20 %程度の彗星Xeの混合で説明できる

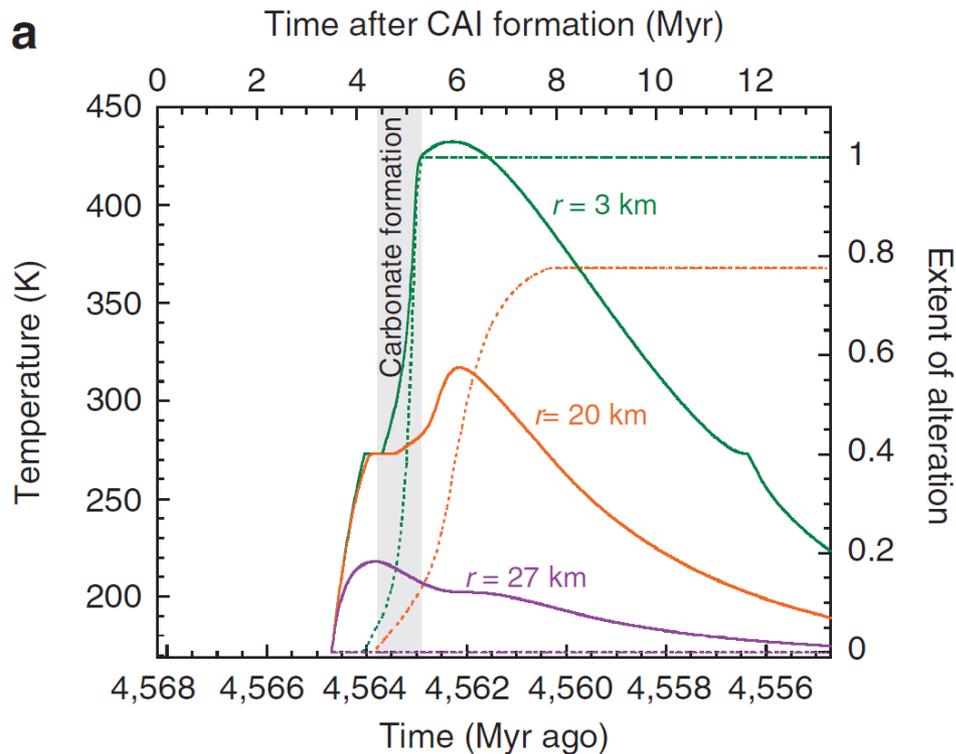
まとめ

- CMコンドライト中の炭酸塩鉱物の炭素同位体比は、 $\delta^{13}\text{C} = 20\text{-}80\text{‰}$ と大きな変動がある
- Tagish Lake隕石中の炭酸塩鉱物の炭素同位体比は、 $\delta^{13}\text{C} = 70\text{‰}$ でほぼ一定である
- Tagish Lake隕石の母天体（D型小惑星）は ^{13}C に富む CO_2 を多く含んでいた
- CM氷と彗星氷は組成（ $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 比）が異なる
- Tagish Lake氷は組成が彗星氷に近い
- 現在outer main beltおよびTrojan regionsに存在する小惑星は太陽系外縁が起源かもしれない

炭酸塩鉱物の ^{53}Mn - ^{53}Cr 年代



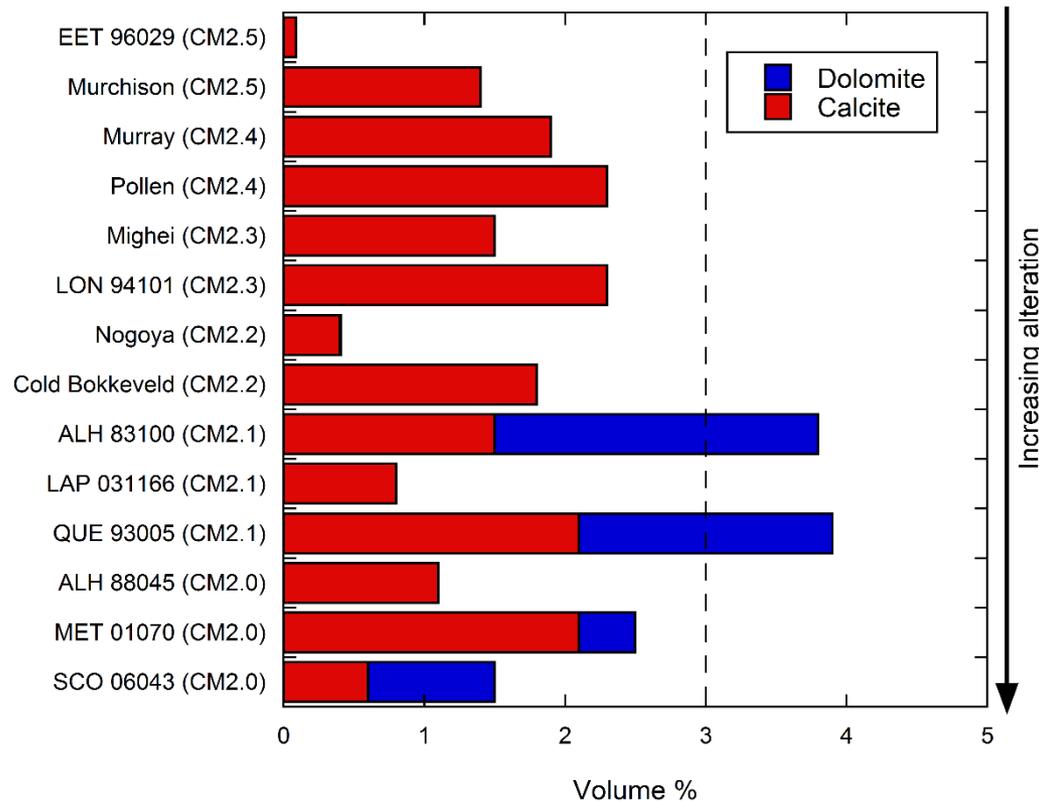
Data from Fujiya et al., 2012, 2013;
Jilly et al., 2014; Jilly-Rehak et al., 2017



Fujiya et al., 2012

- 水質変成作用の熱源は ^{26}Al
- 母天体の形成は太陽系誕生 (CAI形成) から ~ 3.5 Myr

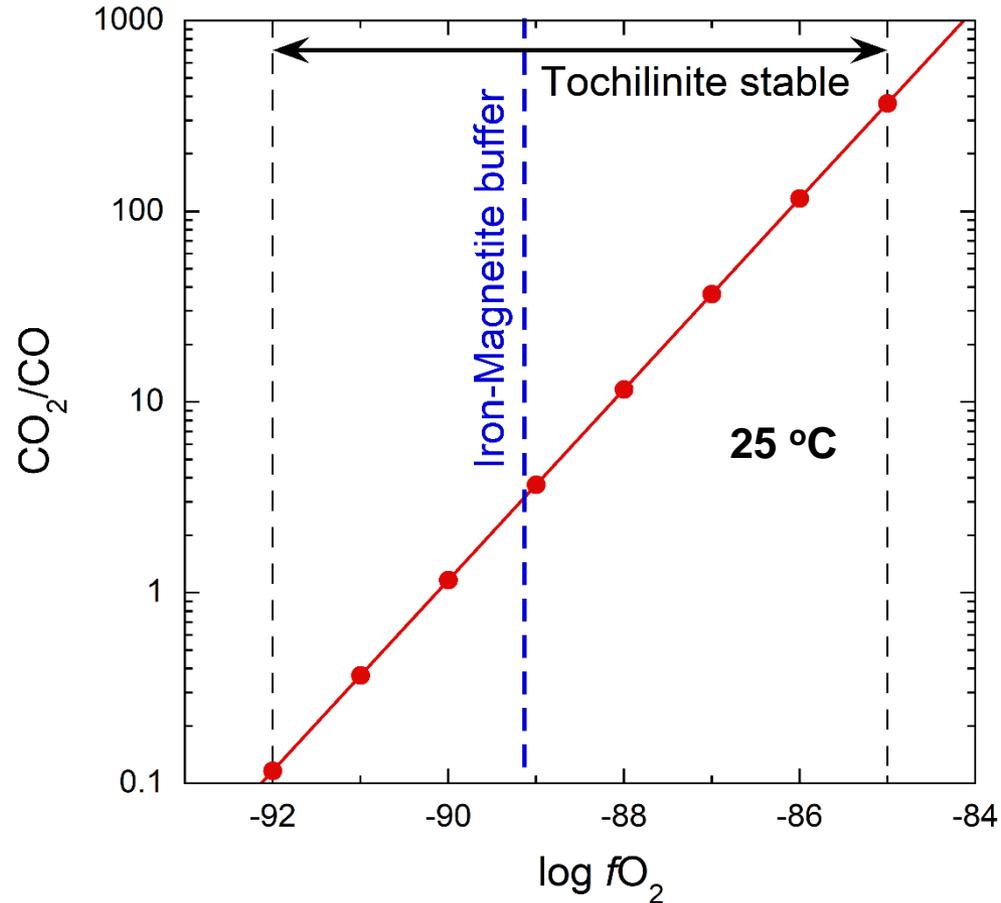
CMコンドライト中の炭酸塩鉱物の存在量



*Data from
Lee et al., 2014*

- CMコンドライト中のCaO : 1.2-2.0 wt.% (Jarosewich, 1990)
- ➡ 1.8-3.0 vol.% CaCO₃

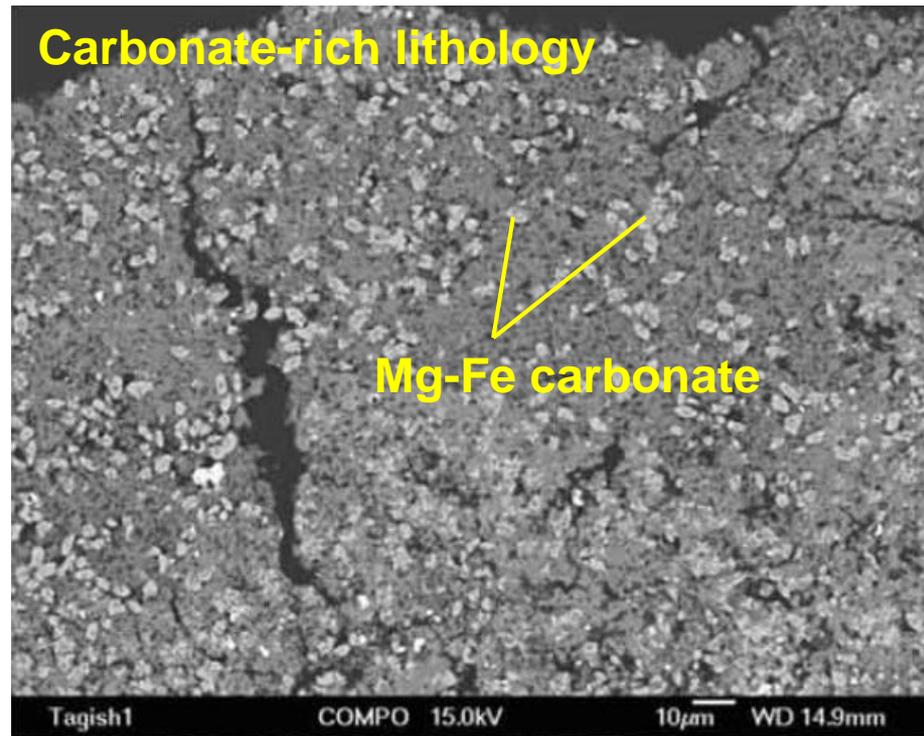
CO₂/CO比と fO_2



- Iron-Magnetite bufferよりO fugacityが大きければ
CO₂/CO > 1

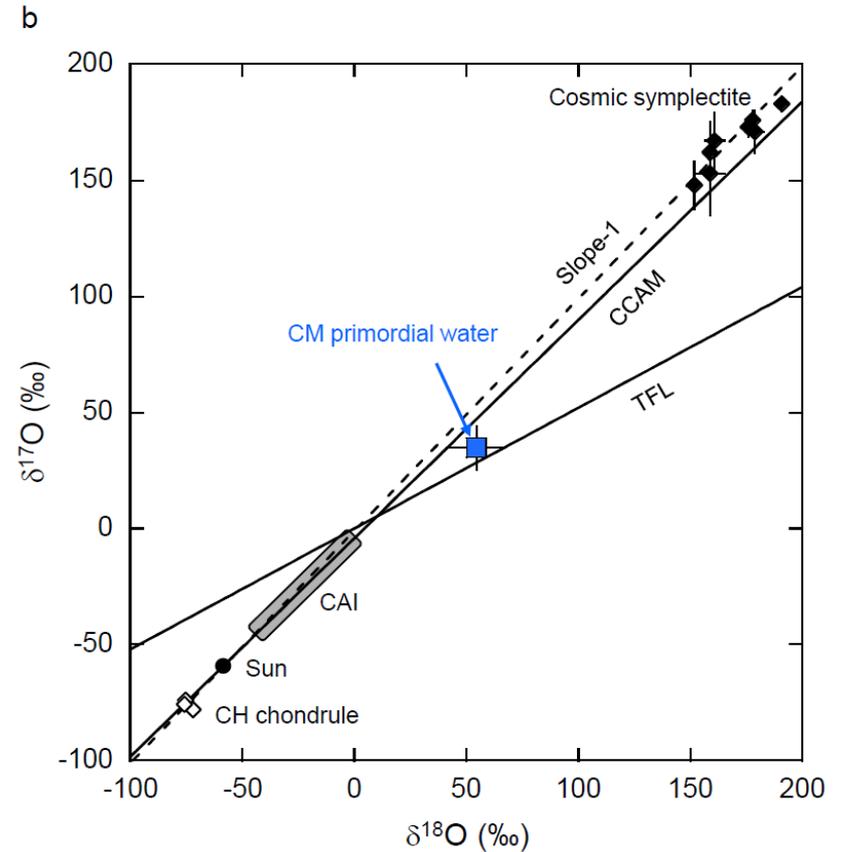
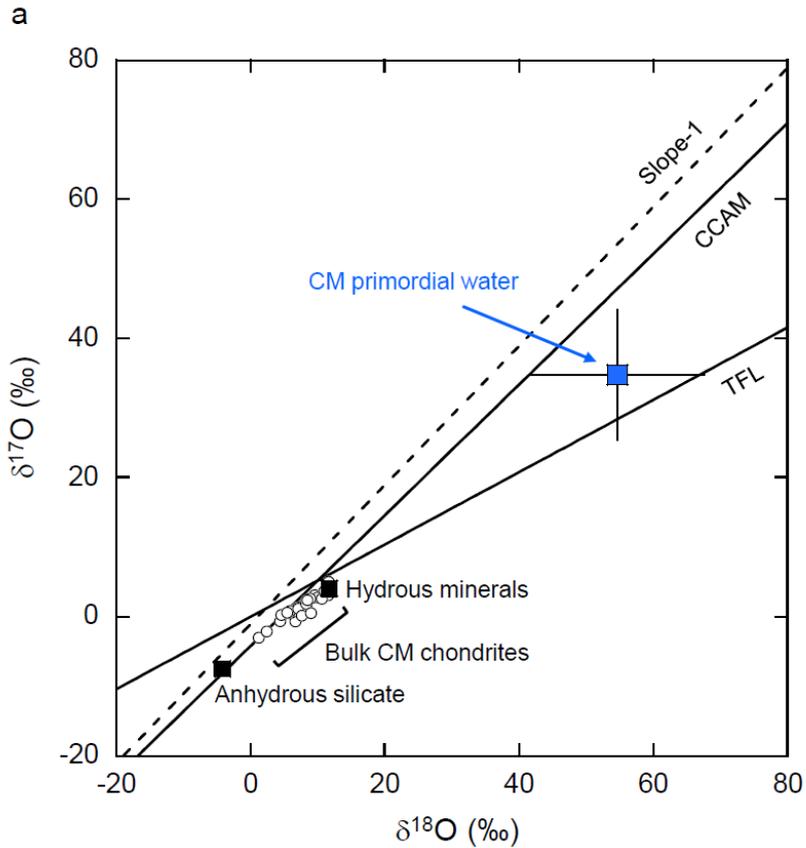
Tagish Lake隕石のCO₂存在量

- Tagish Lake隕石中の炭酸塩鉱物の炭素：
1.3 wt.% (Grady et al., 2002)



Zolensky et al., 2002

CM氷 (H₂O) の酸素同位体比



Fujiya, 2018

系外惑星の質量と公転軌道

