

# 始原小天体有機物とアストロバイオロジー

藪田ひかる（大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻）

## 1. 隕石有機物研究のあゆみ

- ・1970～2000年初め アミノ酸を中心に、生体関連分子の探索
- ・2000年初め～現在 有機物の化学進化と初期太陽系の歴史

## 2. スターダスト計画：彗星塵の有機物分析

## 3. 日本の始原小天体探査と将来の宇宙有機物研究

# 隕石有機物研究のあゆみ： 初期（1970～2000年初め）

# はじまりは、マーチソン隕石のアミノ酸

“私達の生命の素は、宇宙に存在するのだろうか”



1969年 Murchison 隕石の落下  
(炭素質コンドライト)

1970年 隕石に固有のアミノ酸を発見

(Kvenvolden et al., 1970, *Nature*)

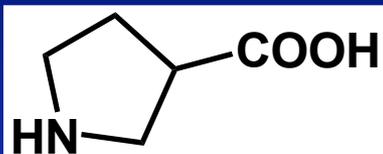
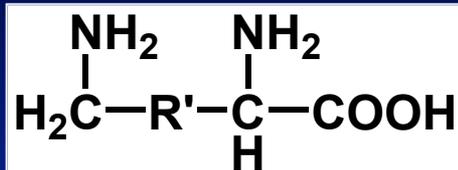
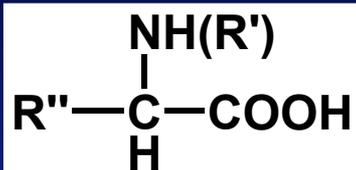
生命の前駆物質が宇宙で、“生物を介さずに”作られる

以降、生体関連分子を含む、400種類を超える有機分子が、有機炭素の豊富な(~2%)炭素質コンドライト(CM,CIグループ)から主に検出され、それらの起源と生成機構が研究された

# 炭素質コンドライト中の可溶性有機分子一覽

## アミノ酸 [74]

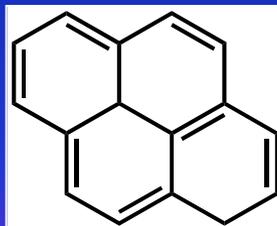
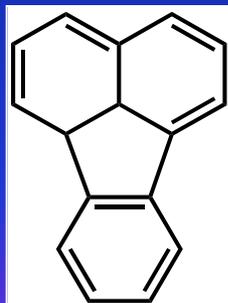
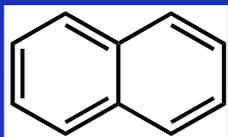
60 ppm



(R', R'' = Alkyl groups)

## 多環式芳香族炭化水素 (PAHs) [87]

15 - 28 ppm



## 脂肪族炭化水素 (C<sub>1</sub> - C<sub>30</sub>)

[140]

12 - 35 ppm

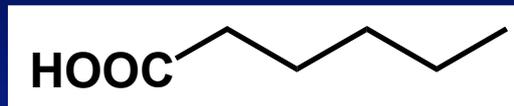


## カルボン酸

> 300

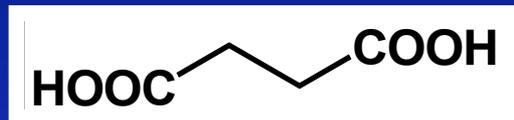
<sup>ppm</sup>  
Mono- (C<sub>1</sub> - C<sub>11</sub>) [48+]

332 ppm



Di- (C<sub>3</sub> - C<sub>10</sub>) [17+]

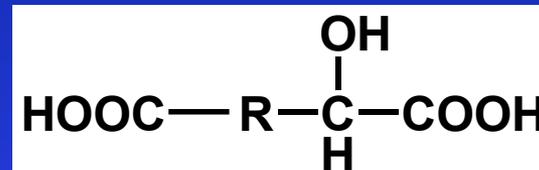
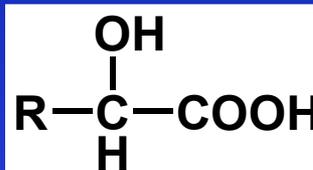
26 ppm



Hydroxy- (C<sub>2</sub> - C<sub>9</sub>) [7]

15 ppm

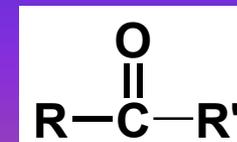
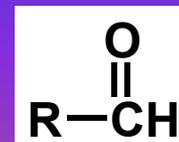
Hydroxydi- (C<sub>2</sub> - C<sub>9</sub>)



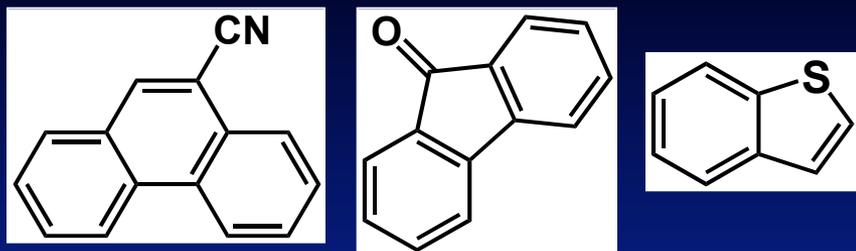
## アルコール、アルデヒド、ケトン

(C<sub>1</sub> - C<sub>4</sub>)

38 ppm

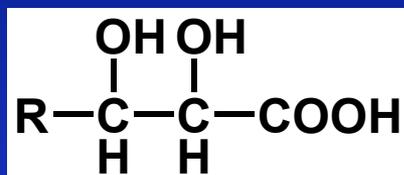
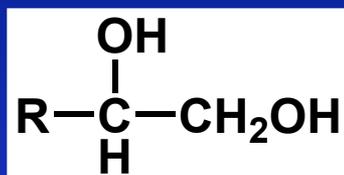


ヘテロ芳香族化合物 [10] ~ 100 ppm



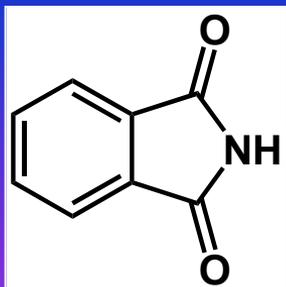
ポリアルコール(糖類)

[19+] ~ 60 ppm



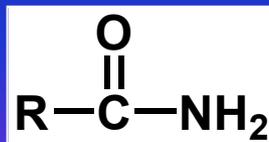
ジカルボキシイミド

[2] > 50 ppm



アミド [27]

(C<sub>1</sub> - C<sub>8</sub>)



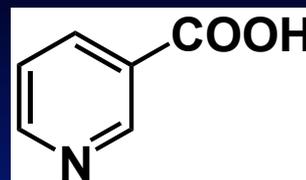
アミン [20]

(C<sub>1</sub> - C<sub>5</sub>) 13 ppm



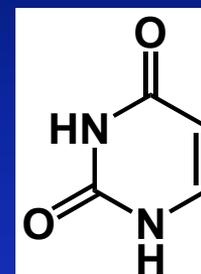
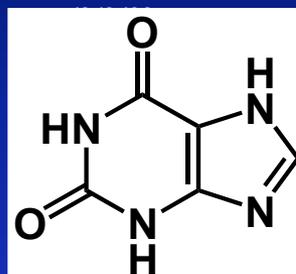
ピリジンカルボン酸 [7]

> 7 ppm



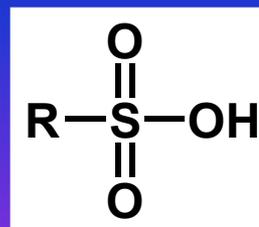
核酸塩基

1.3



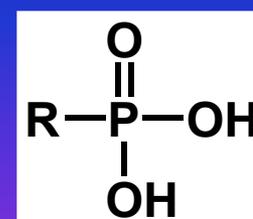
スルホン酸 [4]

67 ppm



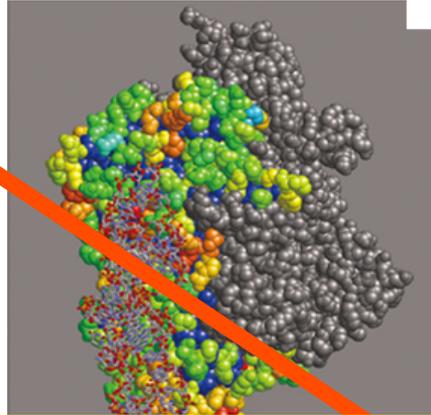
ホスホン酸 [4]

2.5 ppm

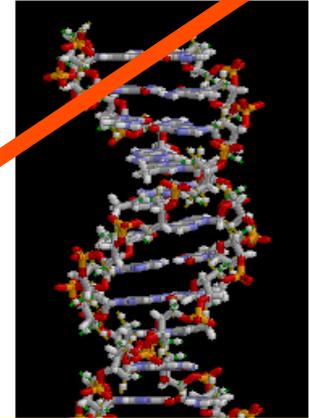


# 炭素質コンドライトから見つかっていないもの (おそらく、ほぼ確実に存在しないもの)

タンパク質

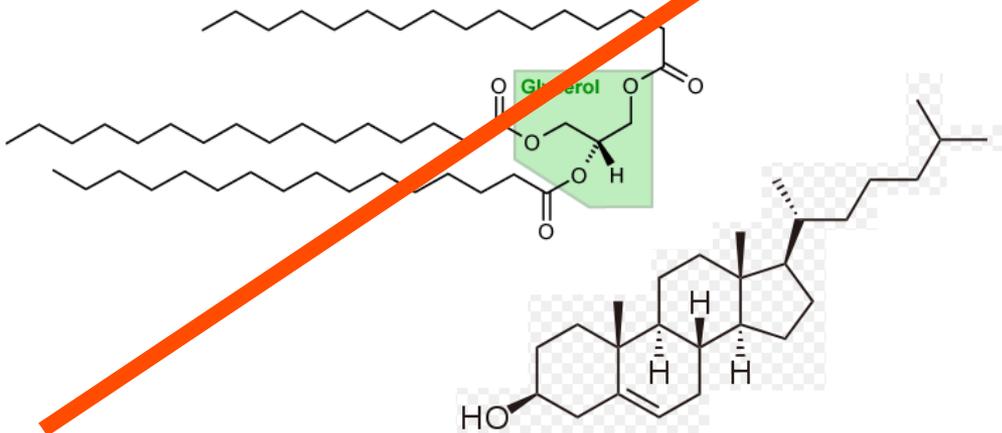


DNA, RNA

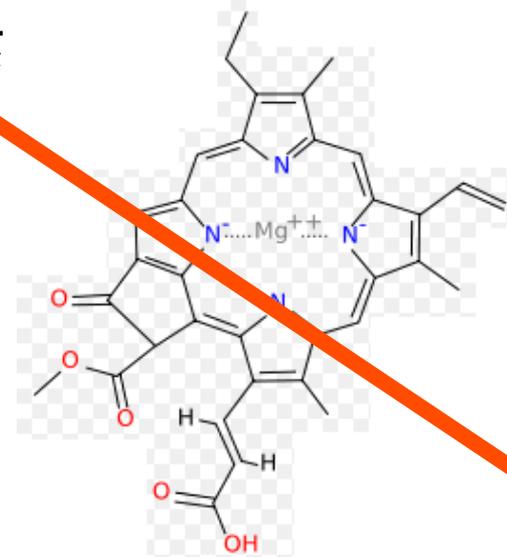


**機能性を持つ有機分子は含まれていない**

脂質



色素



# 隕石に固有なアミノ酸の特徴 (Cronin and Chang, 1993)

1. 70種以上のアミノ酸を検出 (=構造が多様)  
生物が持っていないアミノ酸、地球上では希少なアミノ酸を含む

2. 炭素数が多いアミノ酸ほど存在量が少ない  
(指数関数的減少)

→ 小さい分子から大きい分子が生成

3. 分岐鎖構造が多い



4. アミノ酸(グリシンを除く)のD/L比が、  
ほぼ1:1

5. 熱水抽出して得られる遊離のアミノ酸よりも、  
アミノ酸前駆物質(アミノ酸が他の分子と結合した状態)を酸加水分解して得られるアミノ酸の方が多い

Compound(s)	Formula	Abundance (nmol g <sup>-1</sup> )
Glycine	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub>	28.1–31.0
D-alanine	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>2</sub>	12.9–17.1
L-alanine	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>2</sub>	
β-alanine	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>2</sub>	5.7–8.1
Glycine + alanine		
Sarcosine	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>2</sub>	
<u>α-aminoisobutyric acid</u>	C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> NO <sub>2</sub>	15.0–19.0
D,L-aspartic acid	C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>4</sub>	1.0–3.9
L-glutamic acid	C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> NO <sub>4</sub>	
D-glutamic	C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> NO <sub>4</sub>	1.9–4.6
D,L-proline	C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> NO <sub>2</sub>	
Isovaline	C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> NO <sub>2</sub>	
<u>Isovaline + valine</u>		4.6–7.5
L-leucine	C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> NO <sub>2</sub>	0.8–1.6

(Gilmour, 2003, Review)

6. 炭素・水素・窒素同位体比が非常に高い ( $\delta^{13}\text{C} = +23\text{‰}$ ,  $\delta\text{D} = 1370\text{‰}$ ,  $\delta^{15}\text{N} = 90\text{‰}$ )  
(Epstein et al. 1987) → 地球外起源の証拠。極低温環境を示唆

# 隕石に固有なアミノ酸の特徴 (Cronin and Chang, 1993)

1. 70種以上のアミノ酸を検出 (=構造が多岐にわたる)  
生物が持っていないアミノ酸、地球上で

2. 炭素数が多いアミノ酸ほど存在量が少な  
(指数関数的減少)

→ 小さい分子から大きい分子が生成

3. 分岐鎖構造が多い



4. アミノ酸(グリシンを除く)のD/L比が、  
ほぼ1:1

5. 熱水抽出して得られる遊離のアミノ酸より  
アミノ酸前駆物質(アミノ酸が他の分子と結合し  
た状態)を酸加水分解して得られるアミノ酸の  
方が多い

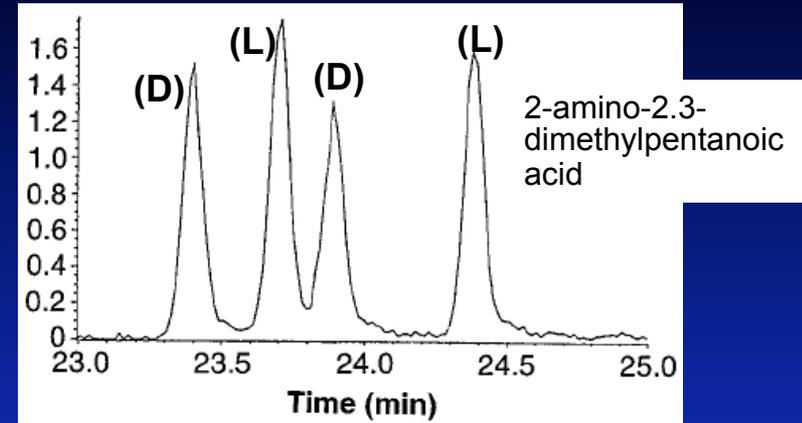
Amino acid detected	Murchison	
	Free (ppb)	Total (ppb)
D-aspartic acid	18 ± 2	120 ± 16
L-aspartic acid	23 ± 3	132 ± 15
D-glutamic acid	10 ± 4	343 ± 44
L-glutamic acid	26 ± 2	357 ± 42
D-serine	<4	<138 <sup>b</sup>
L-serine	<5	<173 <sup>b</sup>
Glycine	345 ± 27	1995 ± 122
β-alanine	302 ± 18	1419 ± 157
γ-amino- <i>n</i> -butyric acid + D,L-β-AIB <sup>c</sup>	437 ± 30	1460 ± 213
D-alanine	162 ± 10	623 ± 6
L-alanine	171 ± 8	659 ± 84
D-β-amino- <i>n</i> -butyric acid	91 ± 6	233 ± 17
L-β-amino- <i>n</i> -butyric acid	93 ± 11	256 ± 15
α-aminoisobutyric acid (AIB)	2349 ± 404	3182 ± 620
D,L-α-amino- <i>n</i> -butyric acid <sup>c</sup>	284 ± 95	403 ± 156
D,L-isovaline	1872 ± 48	2796 ± 298
ε-amino- <i>n</i> -caproic acid (EACA) <sup>d</sup>	264 ± 138	268 ± 123
D-valine	37 ± 2	103 ± 9
L-valine	73 ± 9	218 ± 23
Total	6600	14,600

(Glavin et al. 2006)

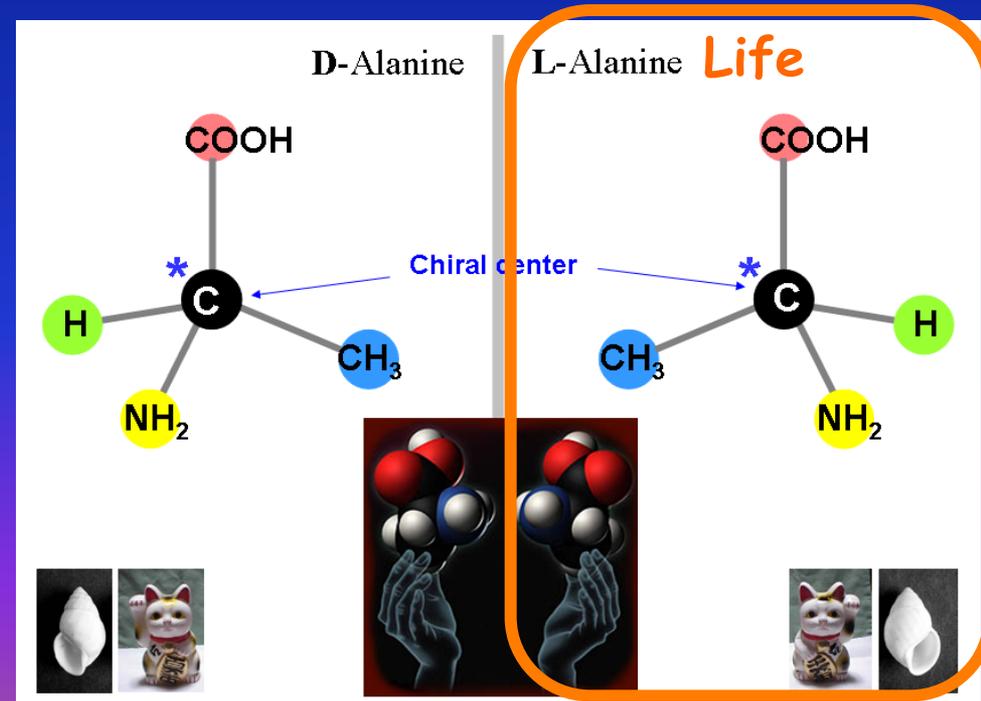
6. 炭素・水素・窒素同位体比が非常に高い ( $\delta^{13}\text{C} = +23\text{‰}$ ,  $\delta\text{D} = 1370\text{‰}$ ,  $\delta^{15}\text{N} = 90\text{‰}$ )  
(Epstein et al. 1987) → 地球外起源の証拠。極低温環境を示唆

# 隕石中のアミノ酸のL体過剰と円偏光起源説

1997年 Murchison隕石から、  
幾つかのアミノ酸のL-体過剰  
(~9.1%)が初めて発見された  
(Cronin and Pizzarello, 1997, *Science*)

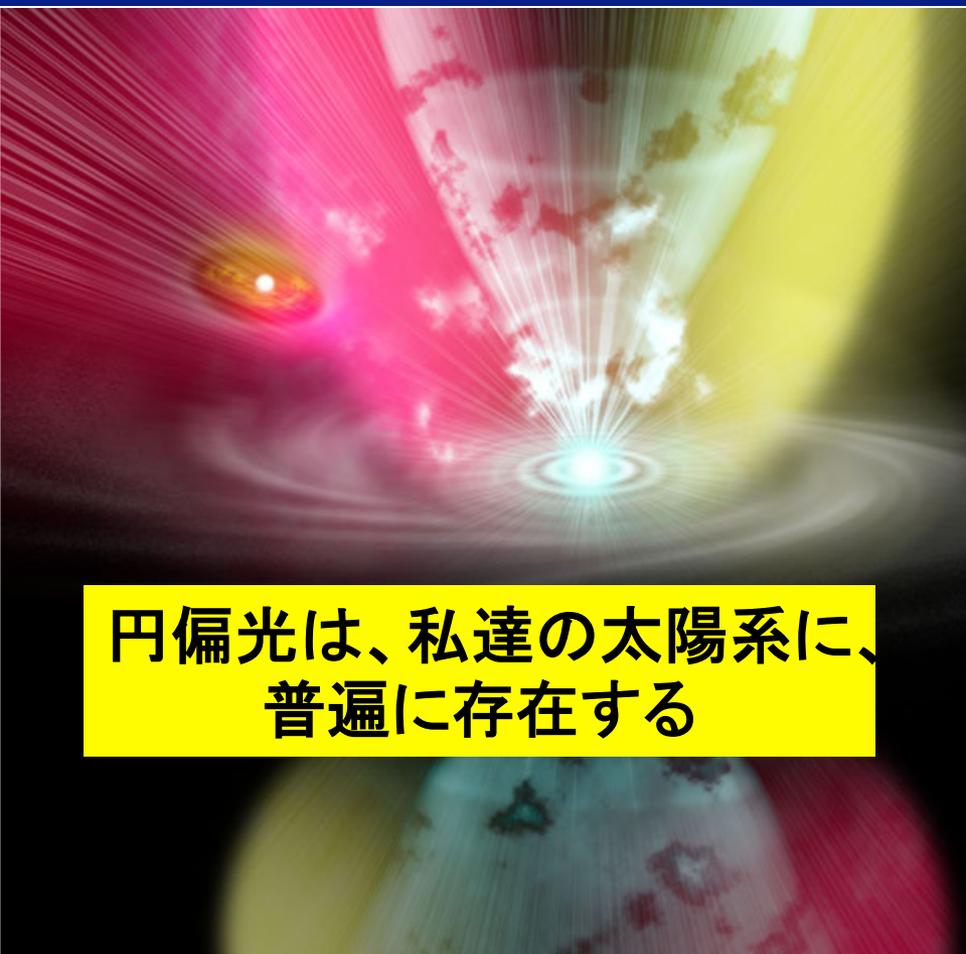


- ・ 宇宙物質のホモキラリティー (不斉) 起源研究の先駆け
- ・ 星形成領域中の右円偏光が過剰のL-アミノ酸を誘発する仮説 (Bailey et al. 1998, *Nature*) を支持
- ・ 隕石中のL体過剰のアミノ酸が地球に運ばれ、地球生命がL体のアミノ酸を選択するようになったという考えも生まれた

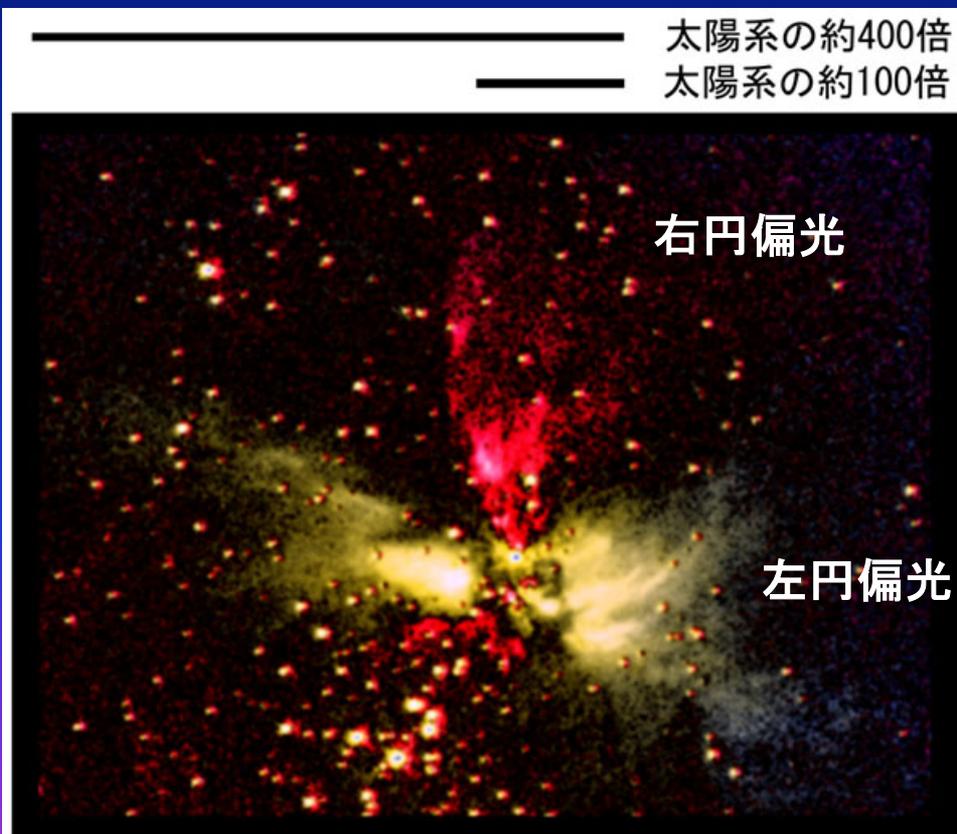


# オリオン大星雲における「巨大な」円偏光の発見 (Fukue et al. 2010)

大質量星形成領域において太陽系が形成され、オリオンで観測されたような大規模な円偏光に原始太陽系が飲み込まれ、片方向の円偏光に照射を受けた結果、アミノ酸(またはその前駆分子)にエナンチオマー異常が引き起こされ、選択的に左型アミノ酸に偏ったのではないか



円偏光は、私達の太陽系に、  
普遍に存在する



(写真、画像共に、国立天文台)

# L体過剰が見られるものは、 $\alpha$ -メチル-アミノ酸

他のアミノ酸と形成過程が異なるのだろうか？

分子レベル安定同位体比質量分析 – 炭素同位体比

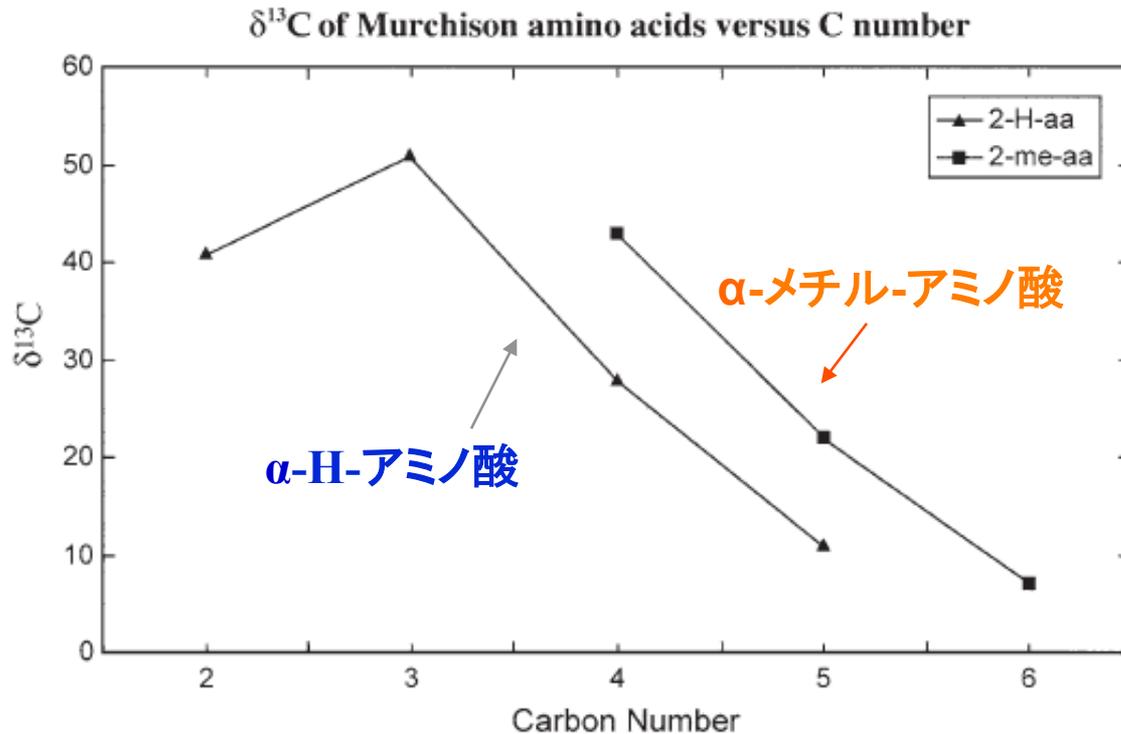
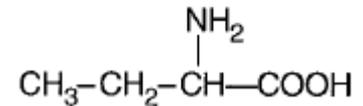
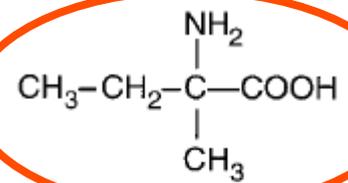


Fig. 3.  $\delta^{13}\text{C}$  values of Murchison  $\alpha$ -amino acids (aa) versus C number. 2-H-aa (left to right): glycine [ $\text{CH}_2(\text{NH}_2)\text{COOH}$ ], D-alanine, DL- $\alpha$ -aminobutyric acid, and D-norvaline [ $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{CH}(\text{NH}_2)\text{COOH}$ ]; 2-methyl-aa:  $\alpha$ -aminoisobutyric acid [ $(\text{CH}_3)_2\text{C}(\text{NH}_2)\text{COOH}$ ], DL-isovaline [ $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{C}(\text{CH}_3)(\text{NH}_2)\text{COOH}$ ], and DL-2-methylnorvaline [ $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{C}(\text{CH}_3)(\text{NH}_2)\text{COOH}$ ].

## 【共通点】

両化合物とも、炭素同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) は炭素数の増加とともに減少

→ 炭素数の小さい分子に反応性の高い $^{12}\text{C}$ が付加し、炭素数の大きい分子が生成する

## 【相違点】

$\alpha$ メチルアミノ酸の方が、同じ炭素数からなる化合物について、 $\delta^{13}\text{C}$ の値が高い

→ 前駆分子の $\delta^{13}\text{C}$ が高い(起源が異なる)

隕石有機物研究のあゆみ：  
現在（2000年初め～今日）

# 有機物だって隕石化学に仲間入りしたい！

→ 様々な分類に属する隕石有機物を分析し、その分子・同位体組成のバリエーションから初期太陽系の歴史と物質進化を読み解く



## コンドライト

クラス	炭素質							普通			エンスタタイト					
グループ	CI	CM	CR	C2	CO	CV	CK	CB	CH	H	L	LL	EH	EL	R	K
岩石学類 タイプ	タイプ 1 or 2							タイプ 3+								

# 隕石中のアミノ酸濃度と水質変成との関係

隕石	隕石グループ	アミノ酸濃度 (ppm)
GRA95229 <sup>[13]</sup>	CR2	249
EET92042 <sup>[13]</sup>	CR2	180
Yamato791198 <sup>[28]</sup>	CM2	68
Murchison <sup>[18]</sup>	CM2	17
Murray <sup>[18]</sup>	CM2	12
ALH83100 <sup>[34]</sup>	CM2	10
LEW90500 <sup>[34]</sup>	CM2	9
Renazzo <sup>[15]</sup>	CR2	4.8
Orgueil <sup>[18]</sup>	CI1	4.2
Ivuna <sup>[18]</sup>	CI1	4
GRO95577 <sup>[13]</sup>	CR1	0.9
Tagish Lake <sup>[5]</sup>	C2	<0.1

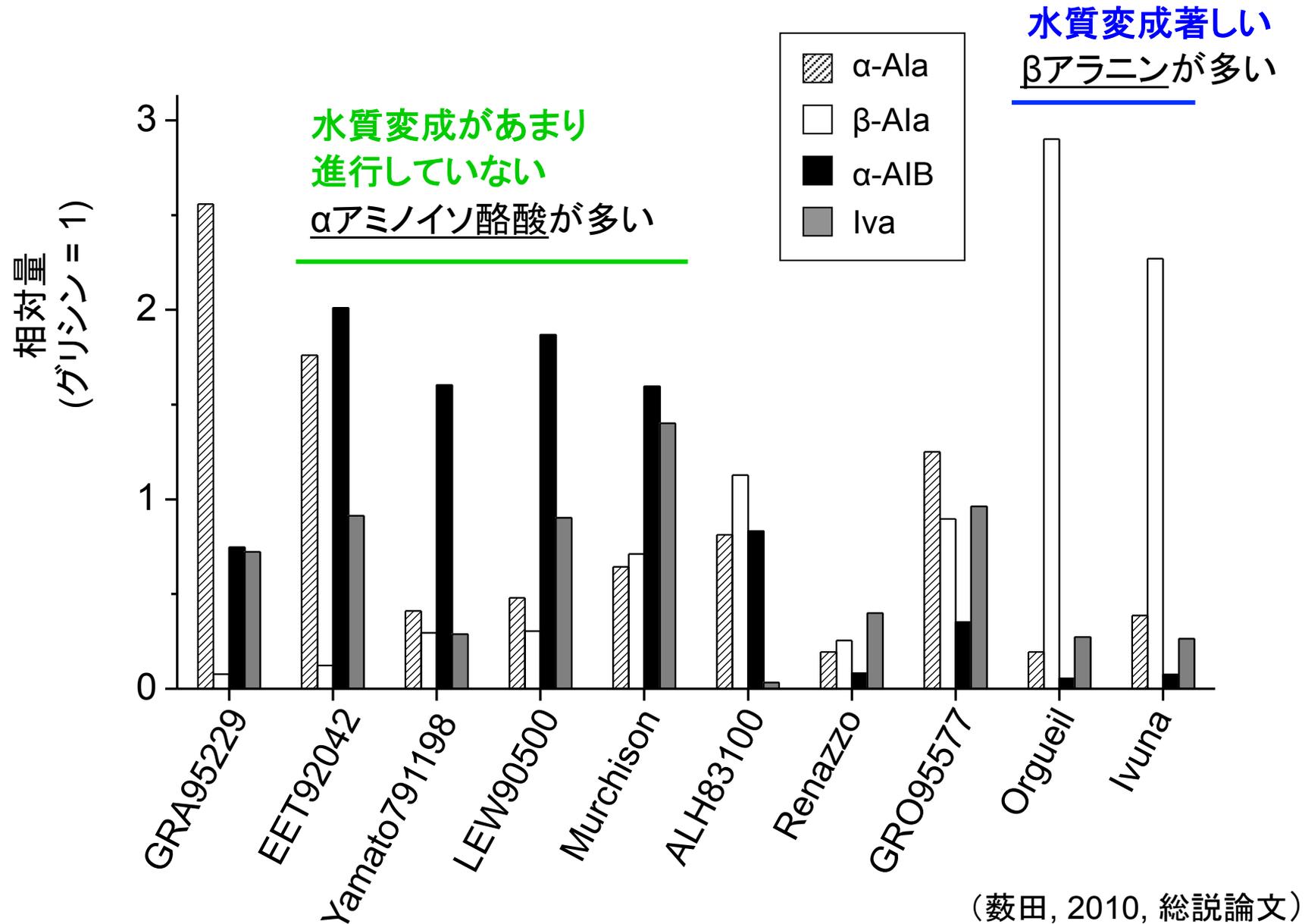
アミノ酸の濃度は  
水質変成の度合(分  
解・除去)に影響さ  
れる



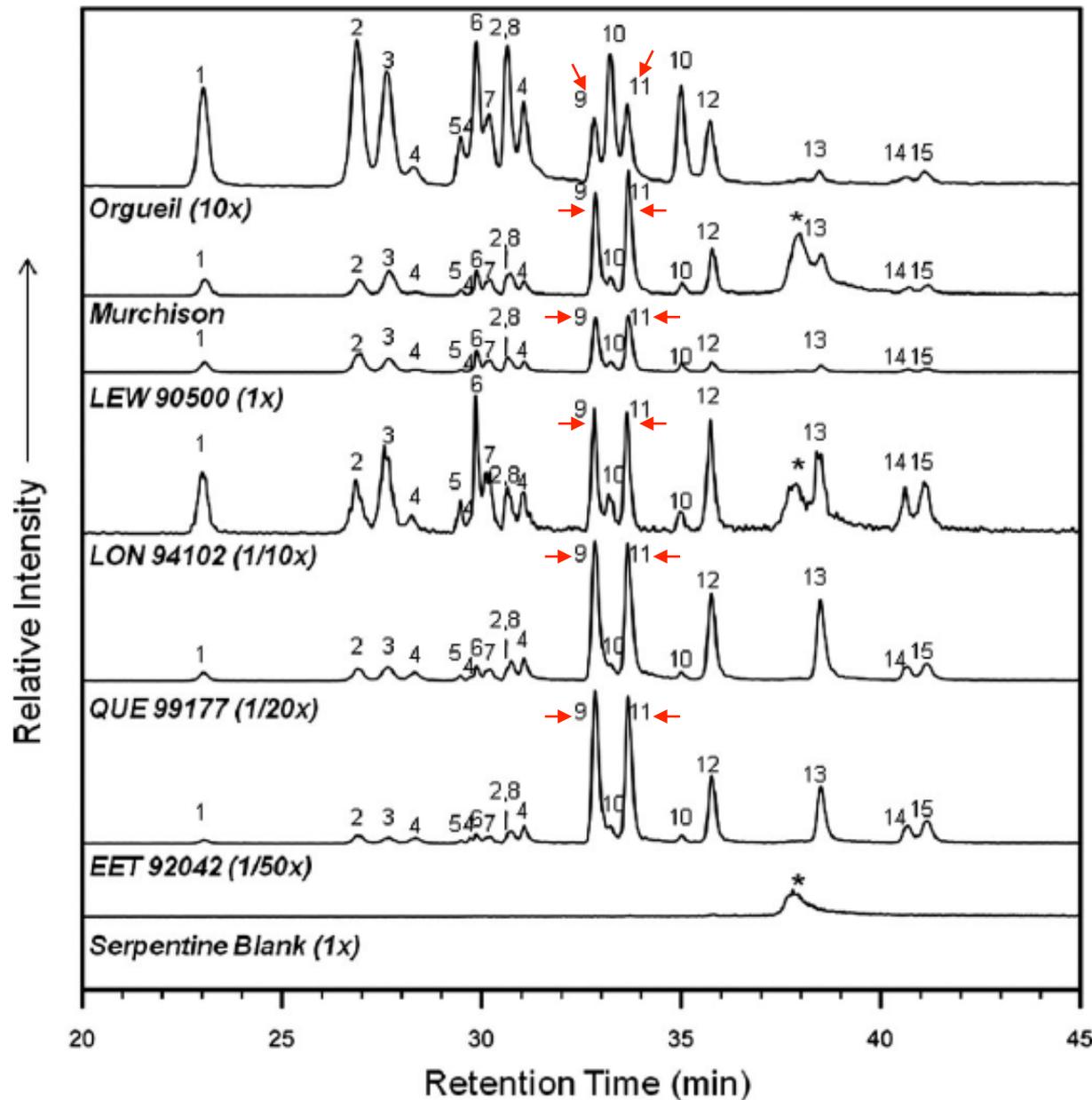
(Ehrenfreund et al. 2001; Glavin and Bada, 2001; Botta et al. 2002; Shimoyama and Ogasawara, 2002; Pizzarello et al 2006; Martins et al. 2007)

(藪田, 2010, 日本惑星科学会誌遊星人, 総説論文)

# 隕石中のアミノ酸組成と水質変成との関係



# アミノ酸のホモキラリティーと母天体水質変成



D-イソバリン (Peak 9) と  
L-イソバリン (Peak 11)  
に注目

水質変成を受けた  
Orgueil (CI) と Murchison  
(CM) には L体の過剰  
(~18.5%) が検出された

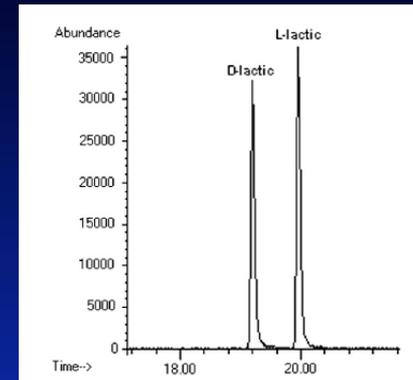
が、水質変成をほとんど  
受けていない QUE99177  
と EET92042 (CR) では検  
出されなかった (ほぼ、  
D:L = 1:1)

(Glavin and Dworkin 2009)

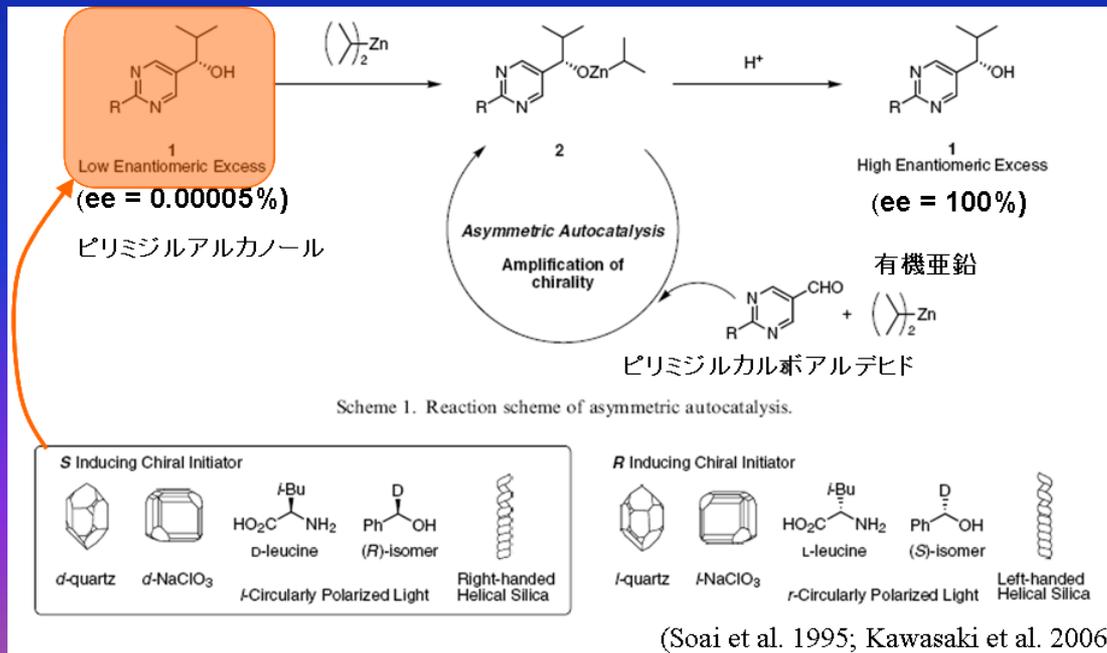
# その他の隕石有機物のホモキラリティー

- Murchison (CM2), GRA 95229, LAP 02342 (CR2) から 乳酸のL体過剰(3-12%)を検出

Pizzarello et al. (2010)



- アミノ酸など可溶性有機分子を除去した後の隕石粉末、および不溶性有機物から、なんらかのホモキラリティーを検出



←eeの低い生成物を反応系にあらかじめ入れておくだけで、自己触媒型不斉増幅反応が起こり、はるかに高いeeの生成物が得られる

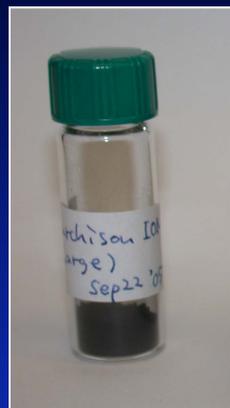
(しかし、有機物を全て除いた鉱物成分からはホモキラリティーは未検出)

Kawasaki, Soai, Pizzarello et al. (2006)

# 不溶性有機物 (Insoluble Organic Matter, IOM)



塩酸/フッ酸  
処理



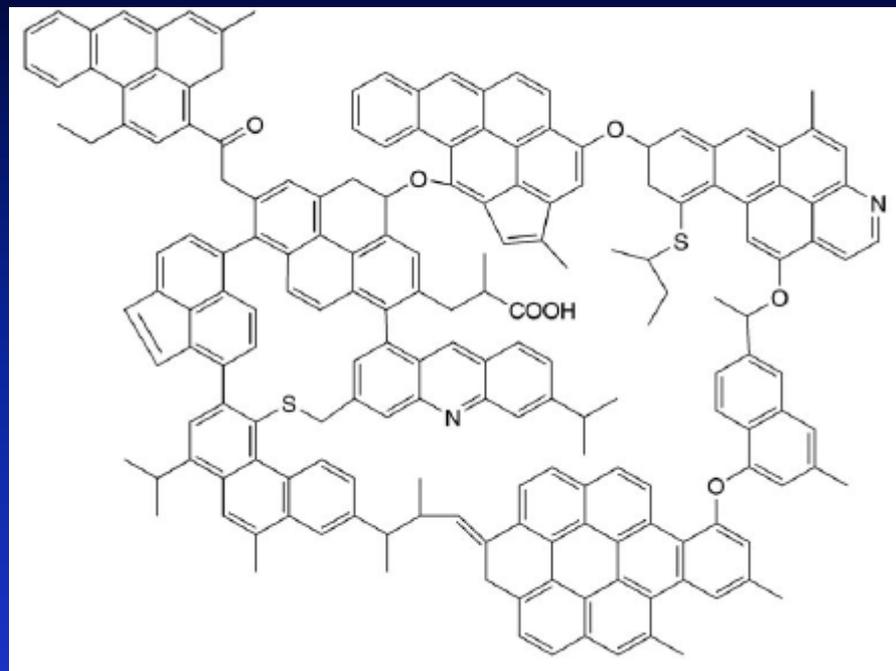
隕石有機物の大部分 (>80%)  
は酸に不溶のMacromolecule

分子量が高く、複雑な構造

- ・・・1~6環程度の芳香族炭素を主成分とし、  
その間を、脂肪族炭素や酸素を含む官能基が架橋している

不均一な同位体組成

グラファイトでもなく、地球上のいかなる炭素化合物とも似ていない



(Pizzarello, 2007)

# 不溶性有機物(IOM)の解剖法

## 破壊法

### 元素分析(燃焼)

### 分解

化学分解

(CuO, RuO<sub>4</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, TMAH.... etc)

熱分解

(瞬間, 含水, 水素化 ....etc)

## 質量分析

ガスクロマトグラフィー質量分析(GC-MS)

同位体質量分析(IRMS)

## 非破壊法

核磁気共鳴(NMR)

電子スピン共鳴(ESR)

### 分光分析

ラマン, 赤外

X線吸収端近傍構造(XANES)

走査型透過X線顕微鏡(STXM)

### 顕微分析

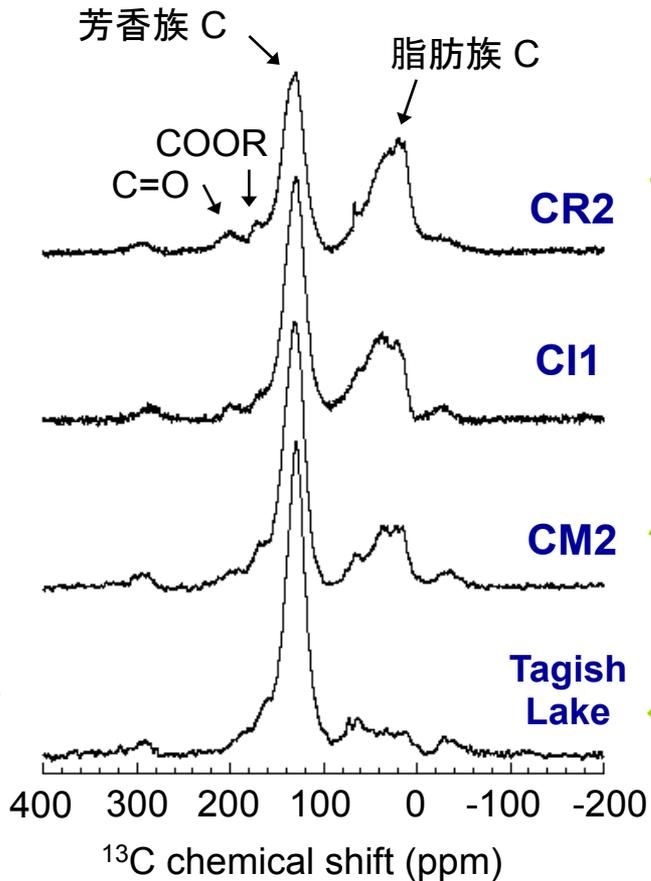
透過型電子顕微鏡(TEM)

二次イオン質量分析(SIMS)

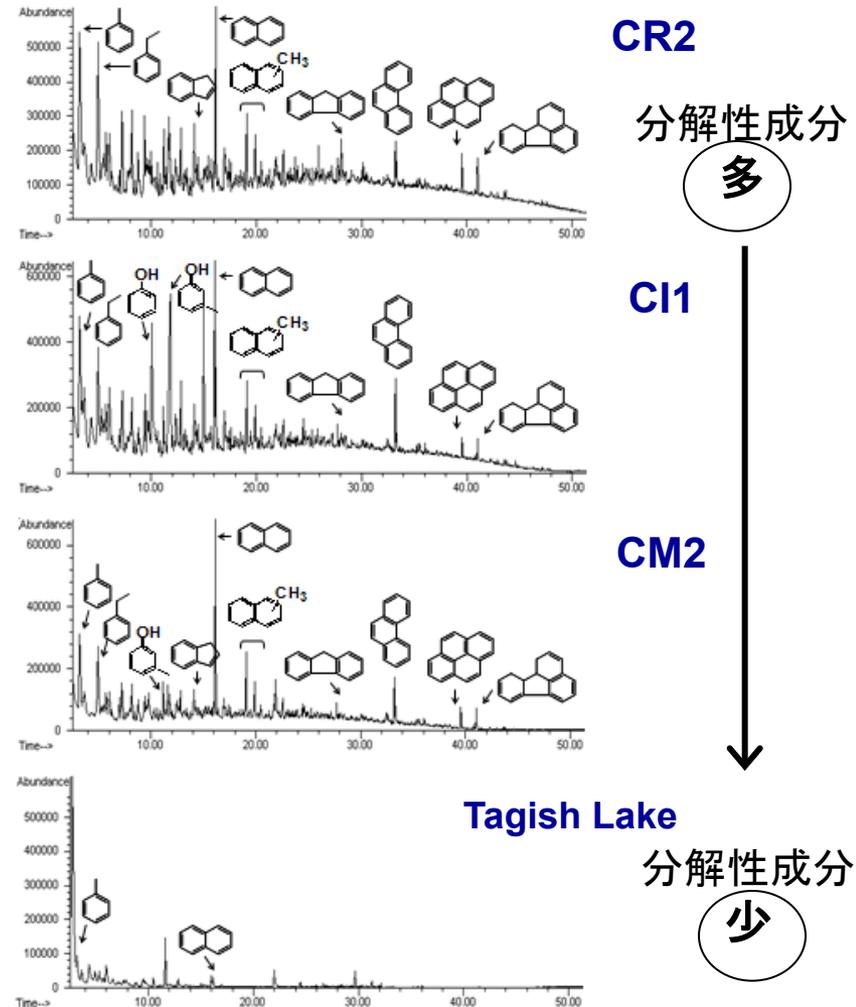
飛行時間型(ToF)SIMS

# コンドライトの隕石グループ間によるIOM構造的バリエーション

固体  $^{13}\text{C}$  NMR (非破壊)



瞬間熱分解-GC/MS (破壊)

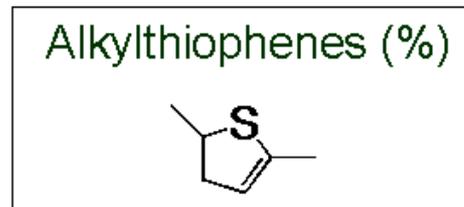
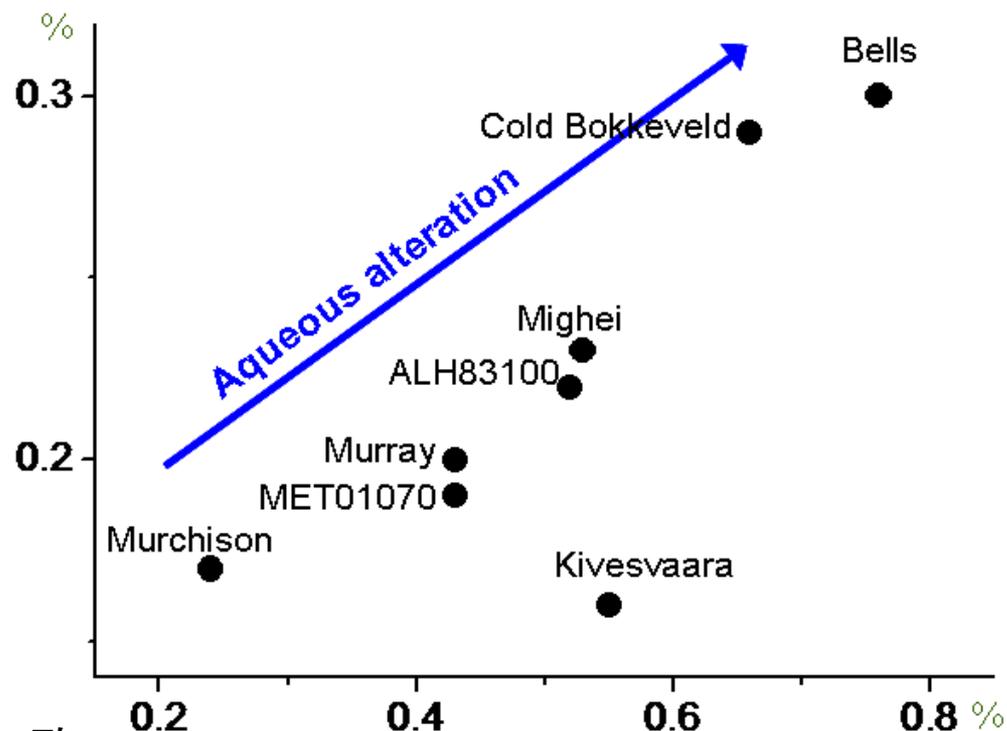
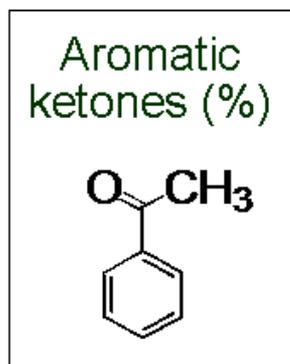


(Cody and Alexander, 2005; Yabuta et al. 2007)

# コンドライトの隕石グループ内での有機構造的バリエーション

熱分解生成分子 O, S化合物に記録される水質変成

[CM2コンドライト]



鉱物学的に評価された  
水質変成度ランキングにもほぼ一致

**Murray < Mighei < Murchison <  
Cold Bokkeveld < Bells**

(McSween et al. 1979)

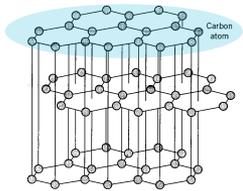
(Yabuta et al. 2009, Meteoritical Society Meeting)

# コンドライトの岩石学的分類によるIOM構造のバリエーション

## 軟X線吸収スペクトル

1s- $\sigma^*$  exciton

グラフェンシートの大きさに由来



Aromatic C

1s -  $\pi^*$

Graphite

Indarch (EH4)

Isna (CO3.7)

Allende (CV3.6)

Bishunpur (LL3.15)

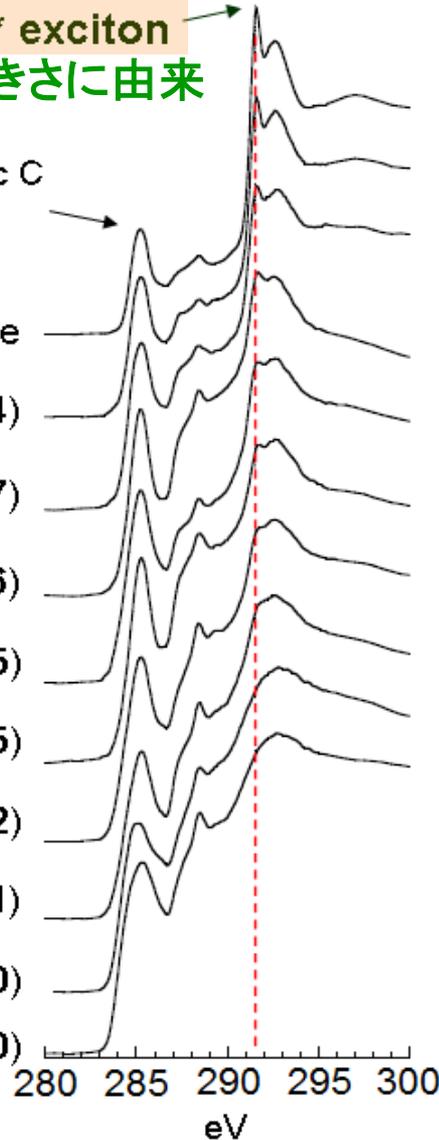
ALHA77003 (CO3.5)

Mokoia (CV3.2)

Kaba (CV3.1)

Semarkona (LL3.0)

ALHA77307 (CO3.0)



Meteorite	Group	% Exciton Intensity	Tmax °C	Tmax °C literature
ALHA77307	CO3.0	4.2	203	~200
Semarkona	LL3.0	4.2	203	200-260
Kaba	CV3.1	13.8	371	300-400
Vigarano	CV3.1/3.4	17.1	415	300-400
Krymka	LL3.1	17.2	416	
Mokoia	CV3.2/3.6	17.7	423	
ALHA77003	CO3.5	17.9	425	300-400
Leoville	CV3.1/3.4	18.6	434	475-540
MET0489	L3.6	18.7	435	~250
Kainsaz	CO3.2/3.6	20.2	453	
Tieschitz	H/L3.6	21.3	467	~300
Chainpur	LL3.4	22.7	483	
Bishunpur	LL3.15	28.8	551	300-350
Allende	CV3.2/3.6	29.1	554	550-600
Isna	CO3.7-3.8	43.2	700	480-700
Indarch	EH4	68	948	~640
Graphite		100		

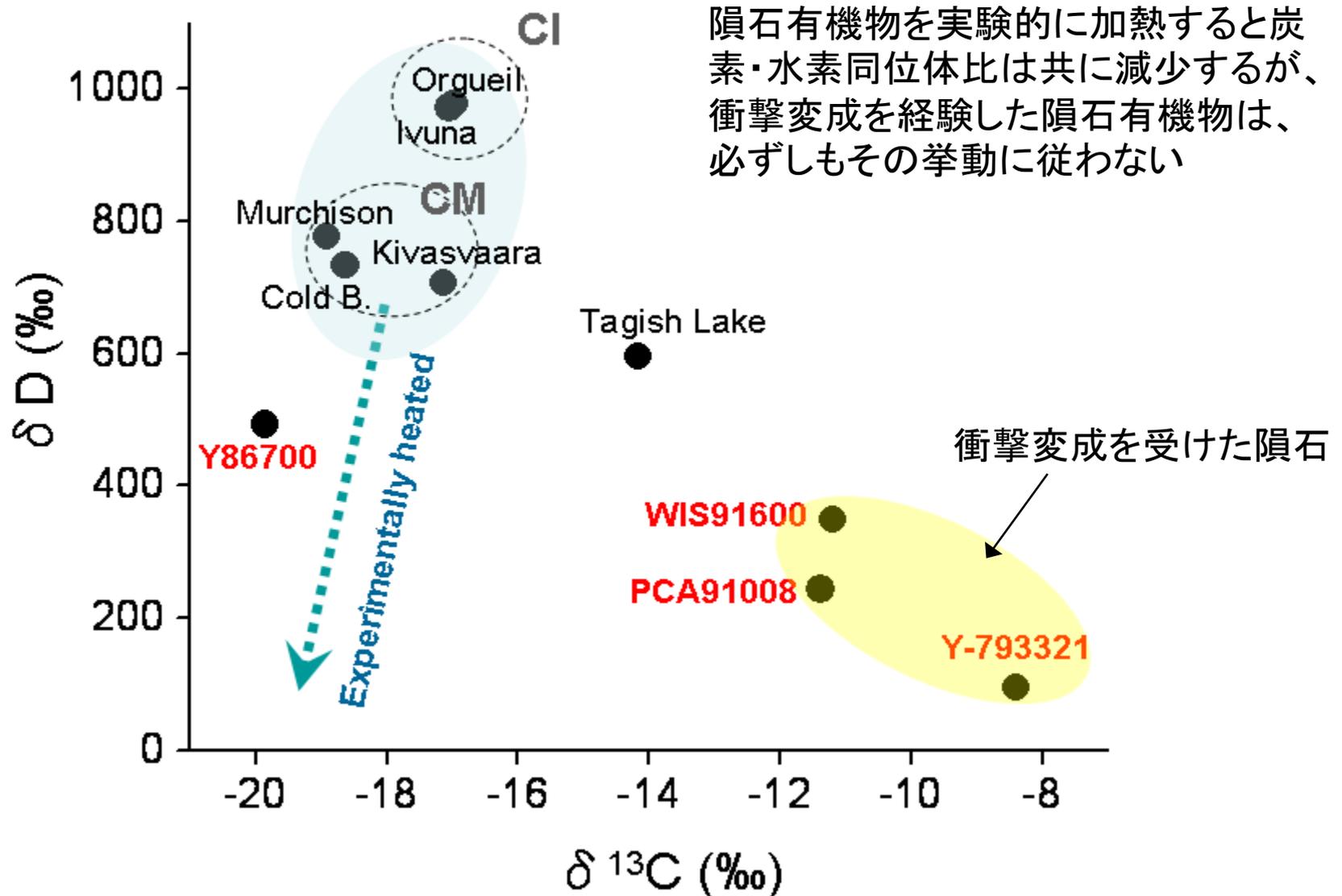
(Cody et al. 2008)

隕石有機物のグラフェン構造を母天体の温度計として適用できる

CO3.7-3.8 コンドライトが700°C (max) で平衡に達し、熱変成を1000万年間 経験したと仮定

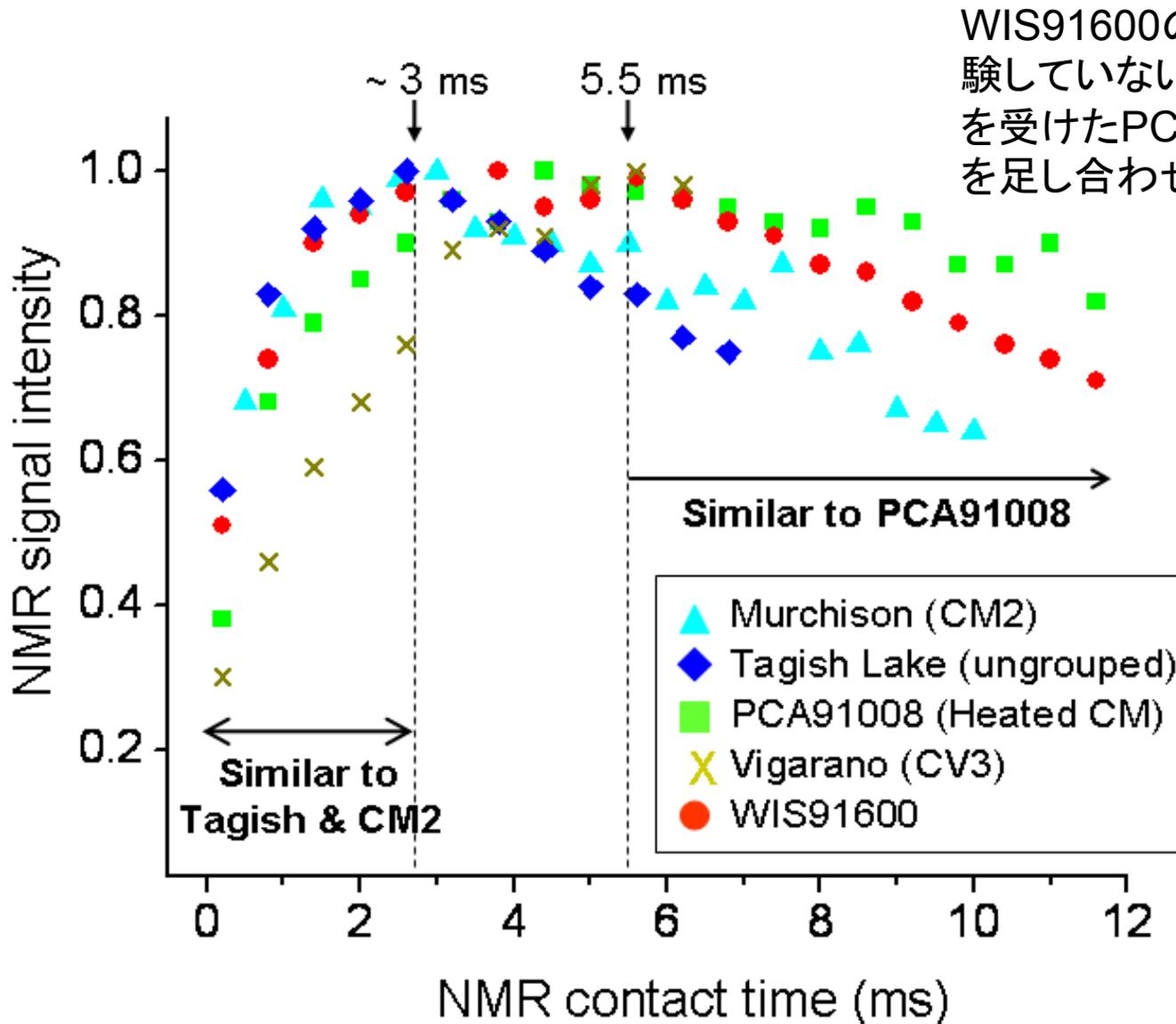
(Cody, Yabuta, Alexander et al. 2008)

# 衝撃変成を経験した隕石有機物はユニーク



(Yabuta et al. 2010)

# 衝撃変成を経験した隕石有機物はユニーク



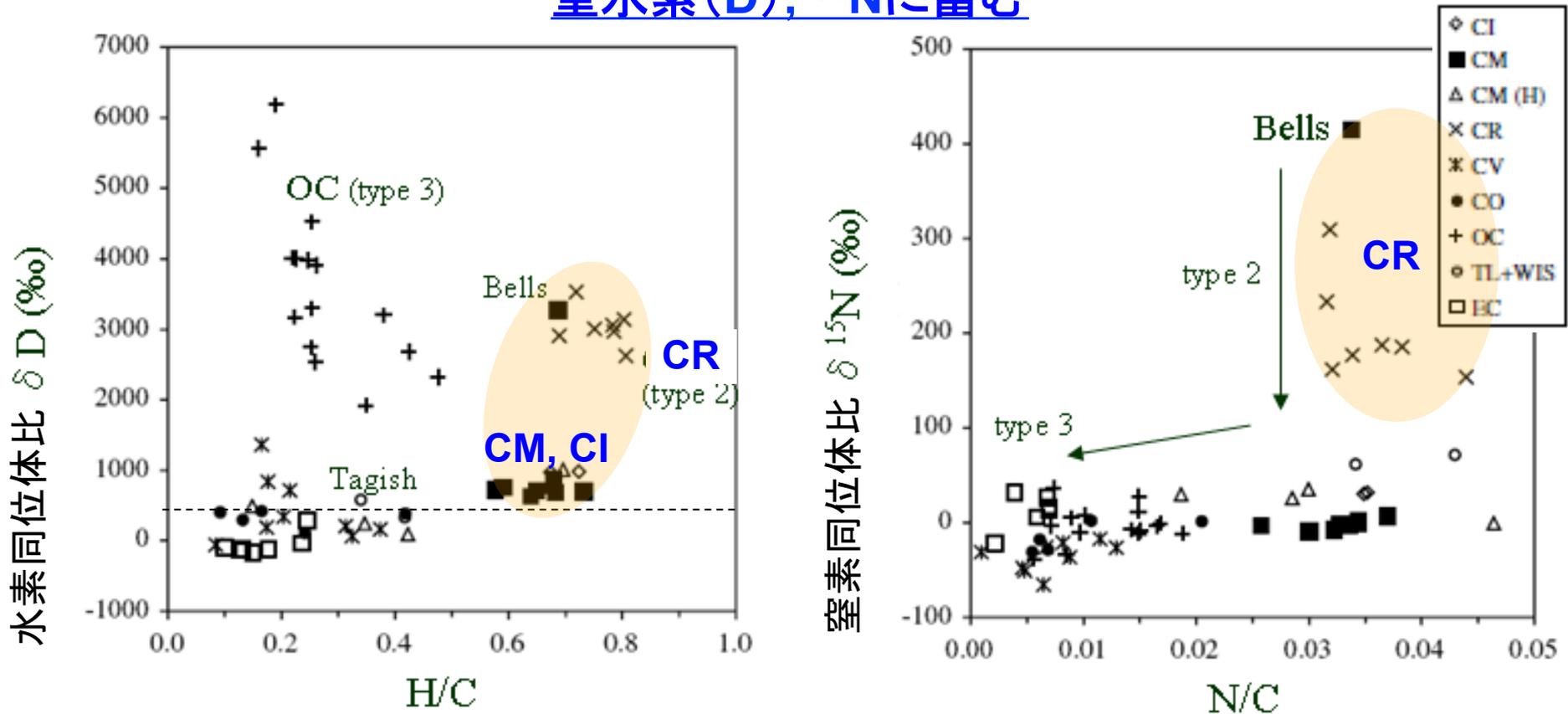
WIS91600の有機物では、衝撃を経験していないMurchisonと衝撃変成を受けたPCA91008で見られる傾向を足し合わせたような傾向を示した。

WIS91600の有機物は、2つ以上の炭素相を有することが示唆される。  
→非常に穏やかな衝撃変成を示唆

# 岩石学的タイプ、隕石グループ毎のIOM同位体組成

始原的な(母天体変成をあまり経験していない)コンドライトグループほど、

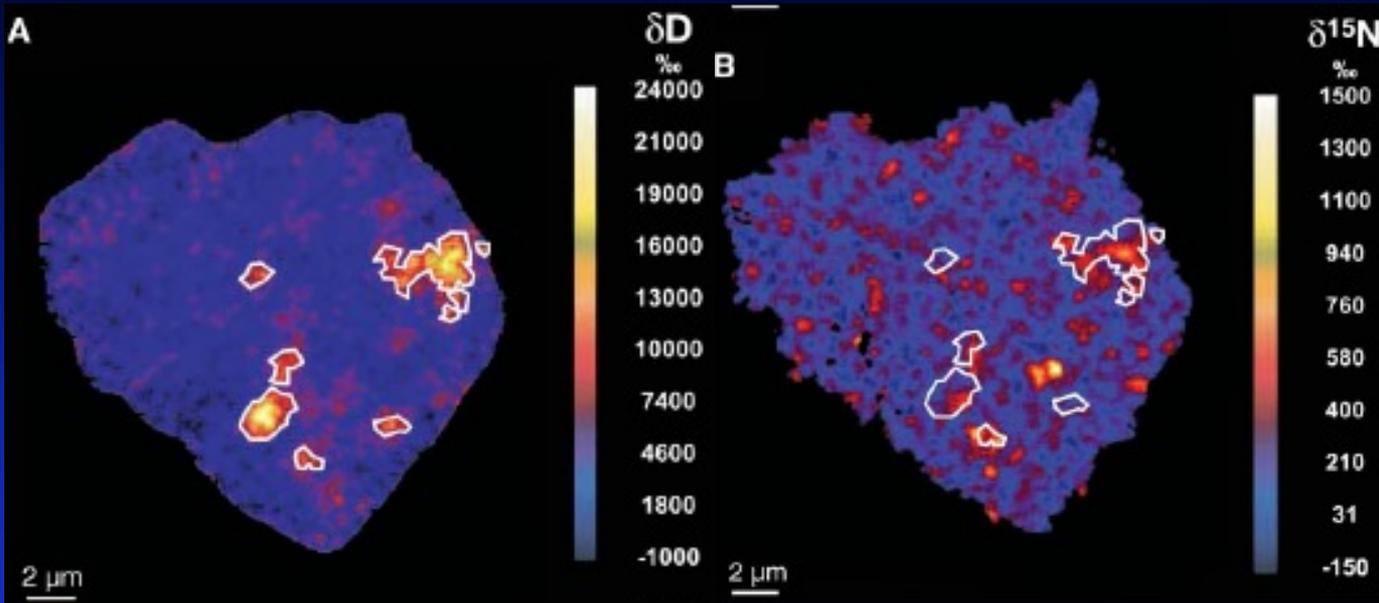
重水素(D),  $^{15}\text{N}$ に富む



高い水素・窒素同位体比( $\delta D$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ )は極低温環境—  
分子雲あるいは太陽系外縁起源

(Alexander, Fogel, Yabuta, and Cody, 2007)

# 隕石有機物の微小領域におけるD, <sup>15</sup>N 異常濃集

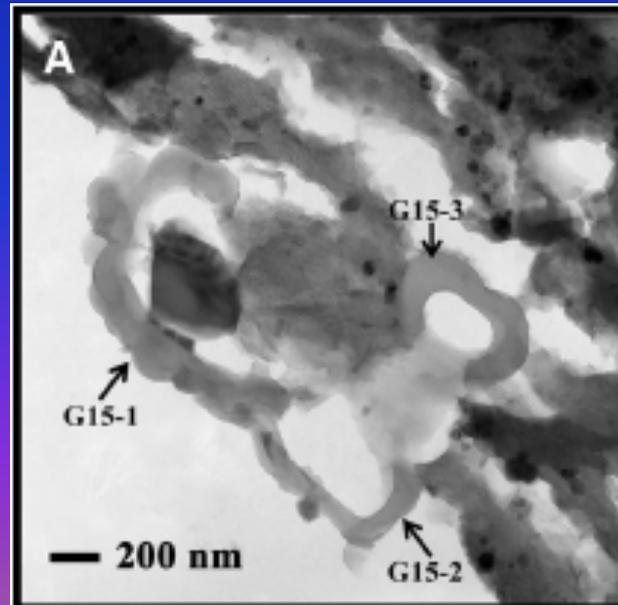


**EET 92042 (CR2)  
IOM**

Busemann et al. (2006)

コンドライトとCP (Chondritic-porous)-宇宙塵は起源を同じくする可能性

重水素 と<sup>15</sup>N の異常濃集領域が必ずしも一致していない  
・・・複数種の分子や化学反応が同位体異常をもたらした

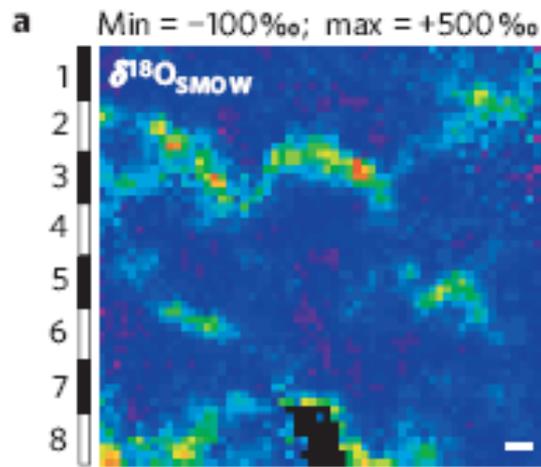


**Tagish Lake  
Nanoglobules**

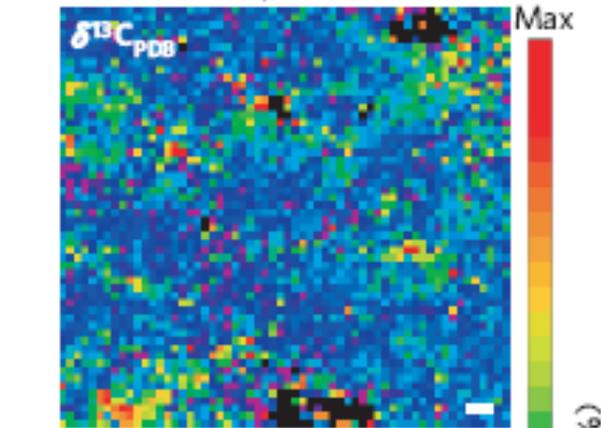
Nakamura-Messenger et al. (2006)

# 隕石有機物の微小領域における $^{17}\text{O}$ , $^{18}\text{O}$ , $^{13}\text{C}$ 異常濃集

$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$

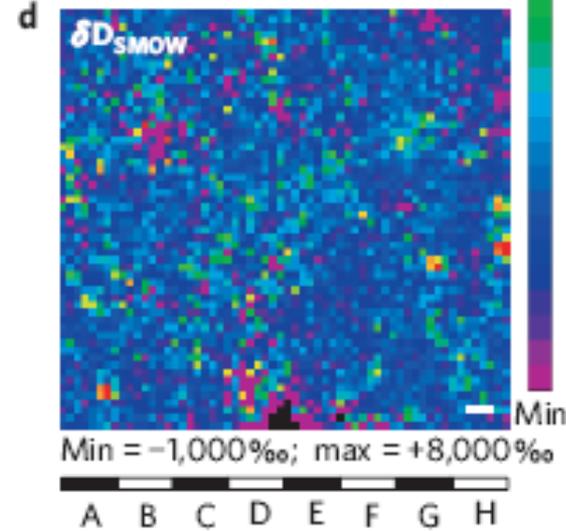
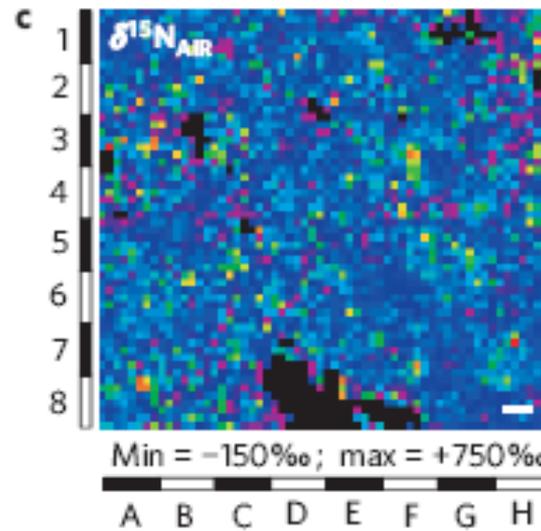


b Min =  $-150\text{‰}$ ; max =  $+300\text{‰}$



$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$

$\delta^{15}\text{N}_{\text{AIR}}$



$\delta\text{D}_{\text{SMOW}}$

60Kより高い温度条件でのCO分子の光解離で説明できる → 太陽系起源

# スターダスト計画： 彗星塵の有機物分析

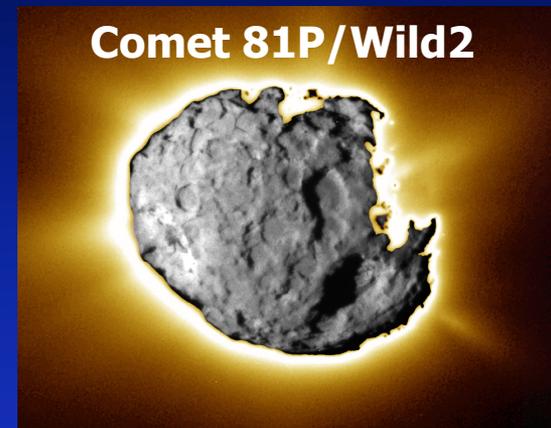
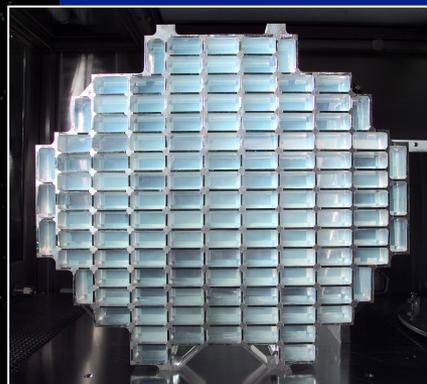
# NASA 国際共同研究「STARDUST」計画

## 世界初の彗星塵サンプルリターン

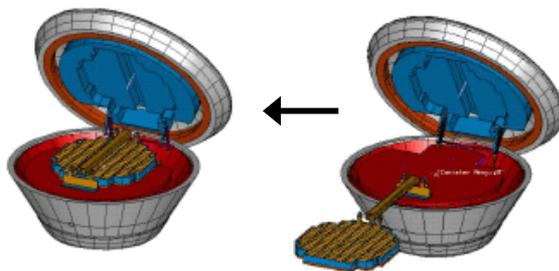
1999.2.7打ち上げ、2004.1.2フライバイ

Comet 81P/Wild2

彗星塵捕獲トレイ



彗星塵捕獲トレイのキャニスター



2006.1.15. 地上に帰還  
(Utah, USA)

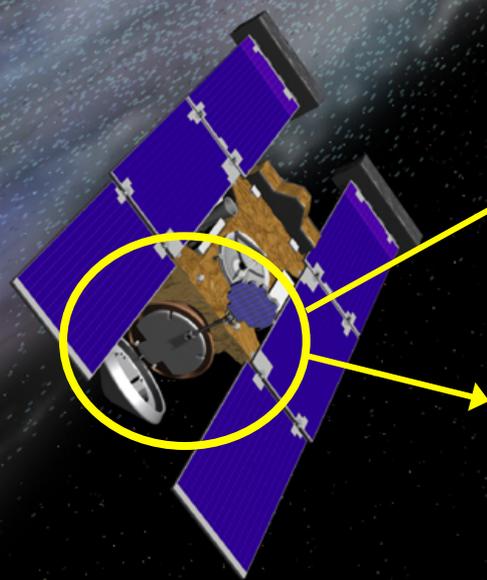
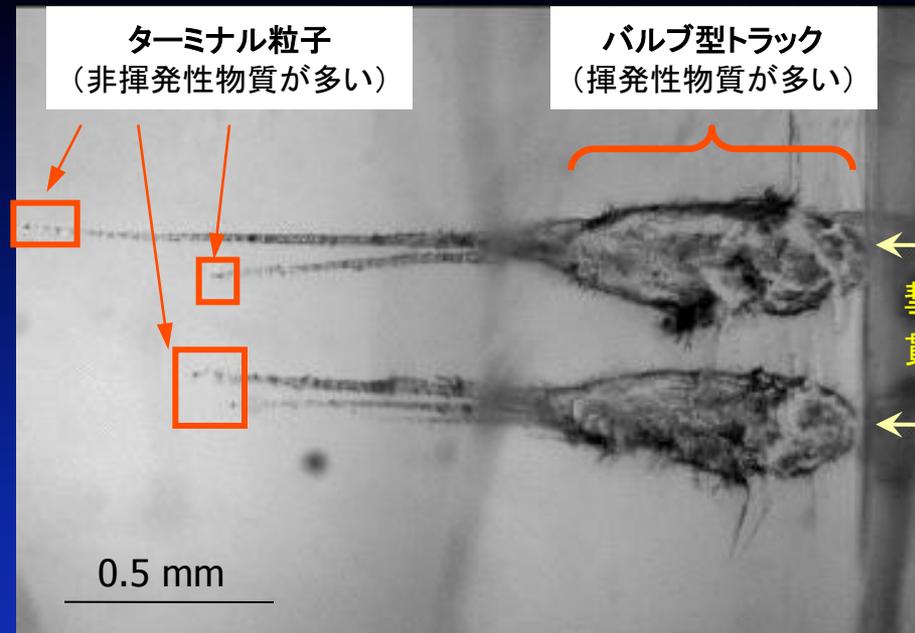


Image of STARDUST spacecraft flyby  
Comet 81P/Wild2 (Credit: NASA)

# 横から

ターミナル粒子  
(非揮発性物質が多い)

バルブ型トラック  
(揮発性物質が多い)

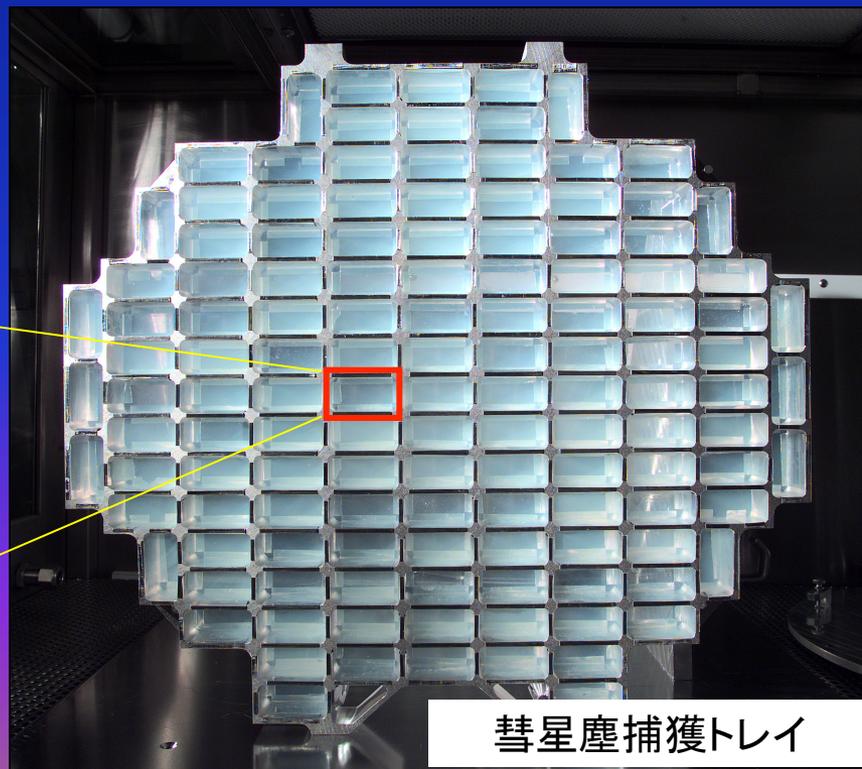
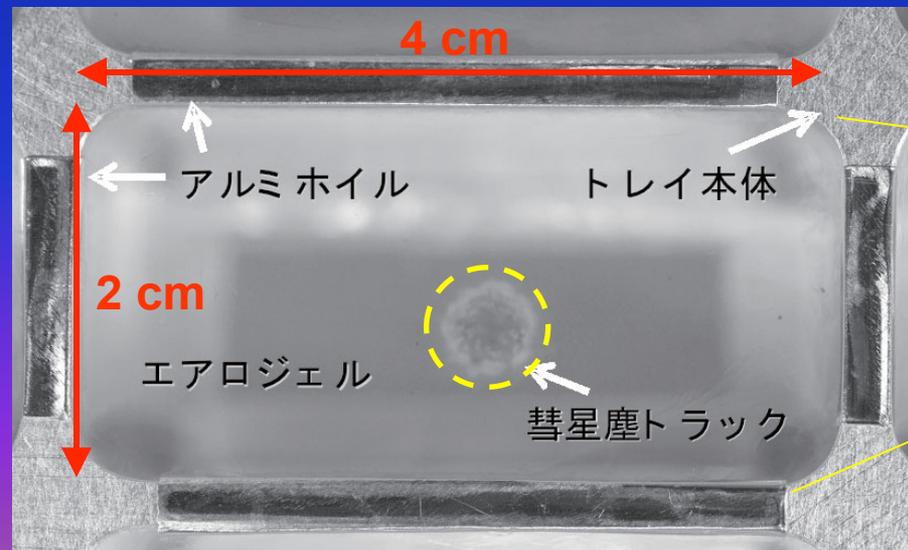


## シリカエアロジェル:

空孔率が99.8%の  
多孔質シリカ  
彗星塵の探査機への  
高速衝突(6.1 km/s)  
による塵成分の損失や変成を最小限に抑える  
ための捕獲材



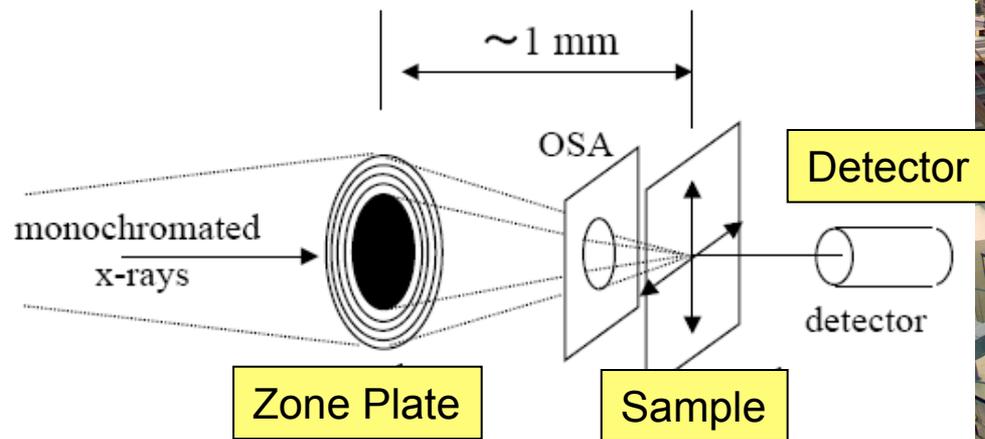
# 正面から



彗星塵捕獲トレイ

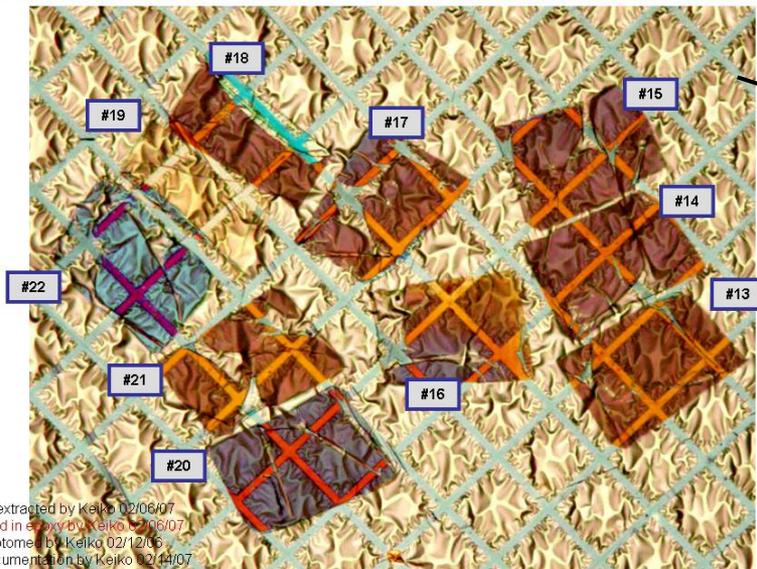
# Polymer STXM (Scanning Transmission X-ray Microscope), Beamline 5.3.2, Advanced Light Source

集光X線に対し、微小な試料を走査して透過したX線の強度を検出することにより、軟X線吸収スペクトルを取得、試料の化学結合状態を定量評価する

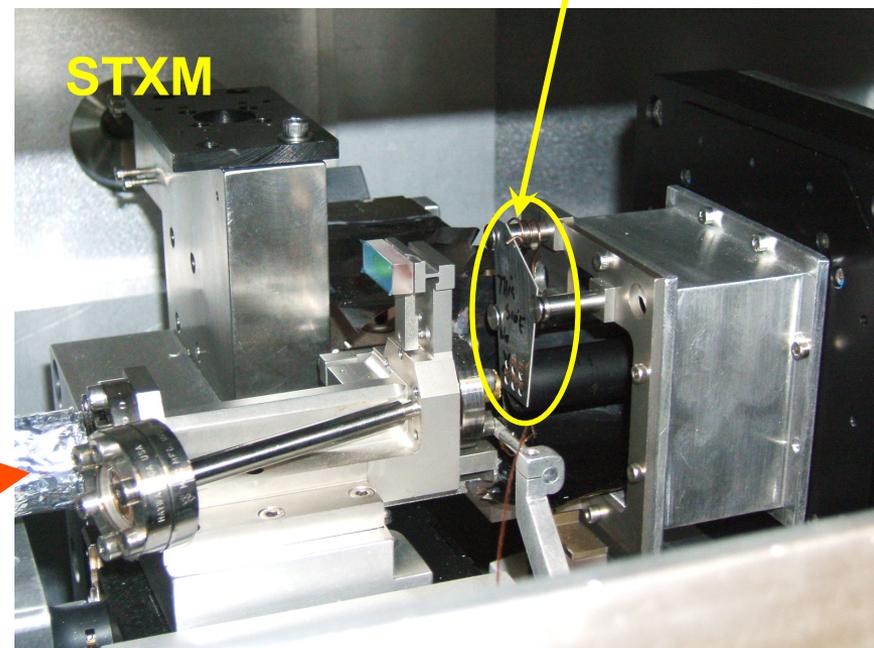
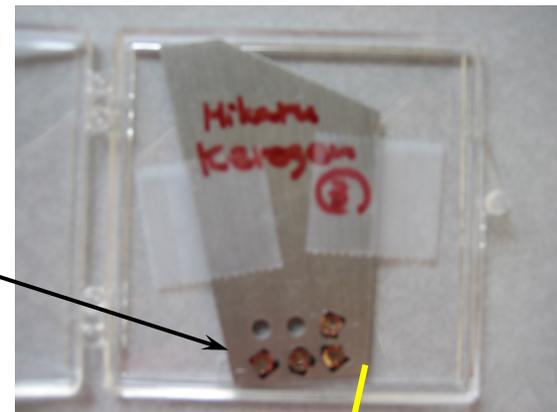


一つ一つの彗星塵粒子が取り出され、  
硫黄またはエポキシ樹脂に埋包後、ウルトラマイクロ  
トームで薄切され、TEMグリッドに設置

STARDUST Sample# C2092,2,80,46,2 embedded in Embed812 epoxy  
Grain along the bulb track#80 wall Grid#2 70nm thickness x10 on Amorphous C



厚さ~100nmの薄片試料  
を乗せたTEMグリッド



$$OD \text{ (optical density)} = \ln(I_0/I)$$

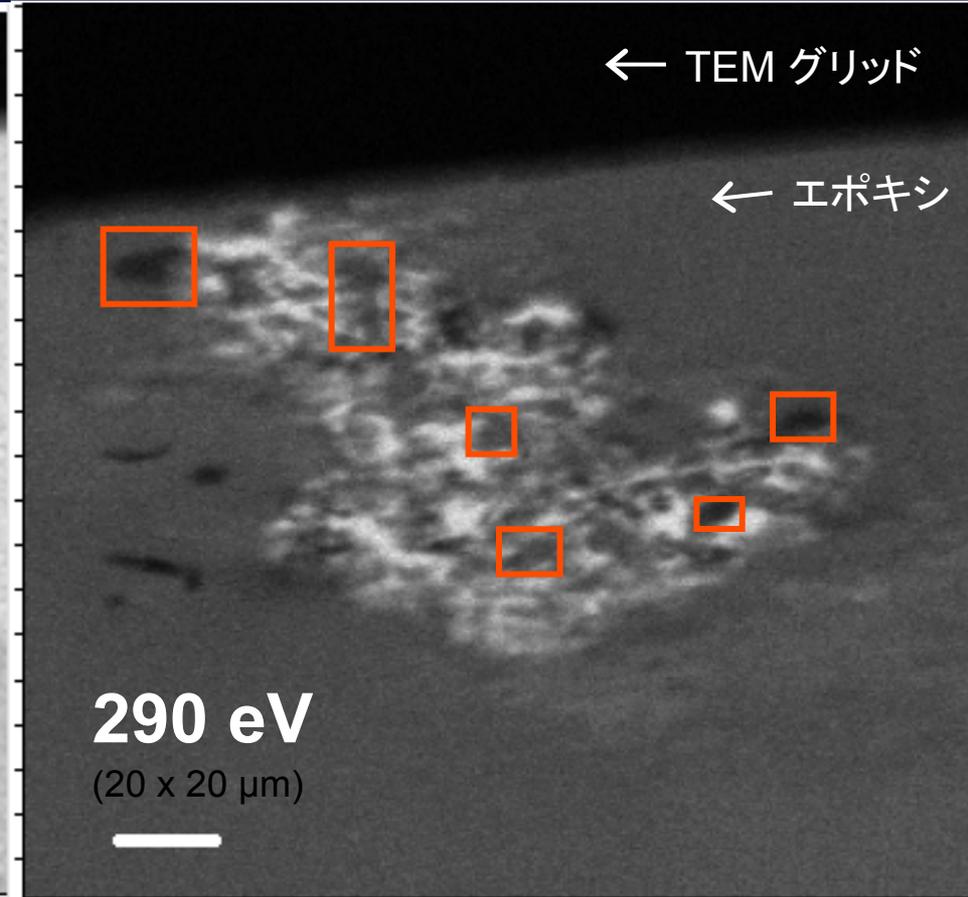
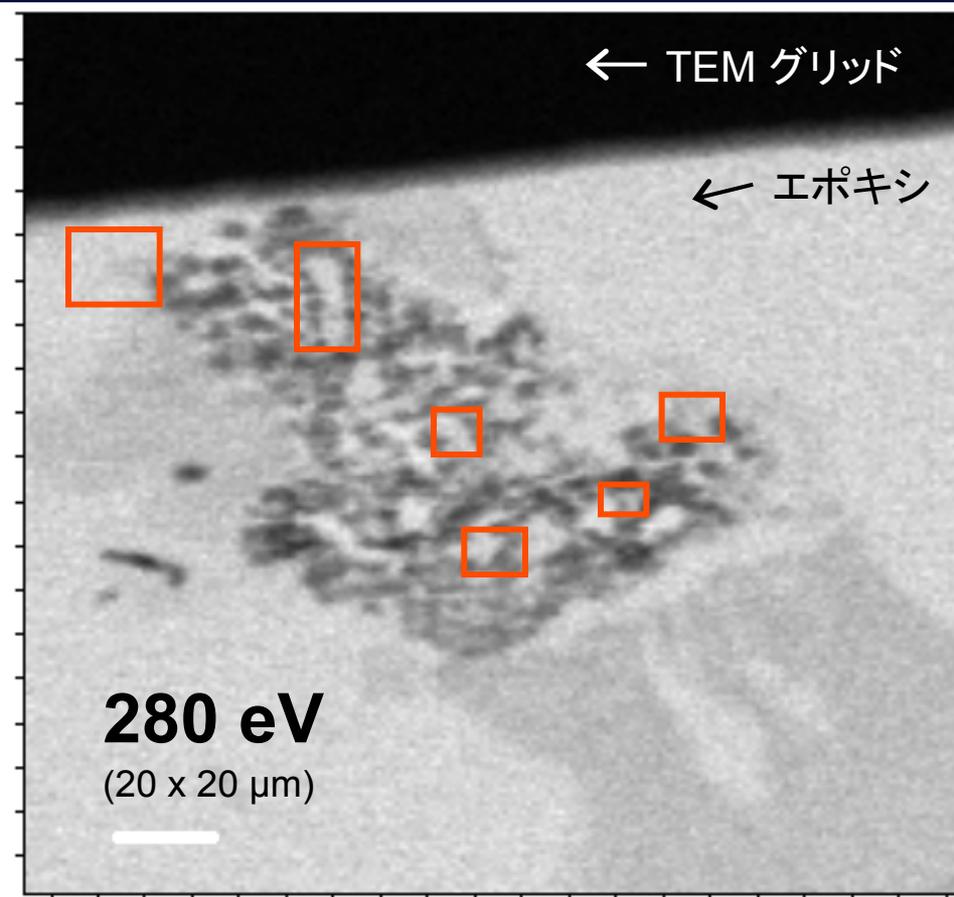
I: 試料透過後のX線強度

$I_0$ : 試料のない部分を透過した後の  
X線の強度

Soft X ray

(Kilcoyne et al. 2003)

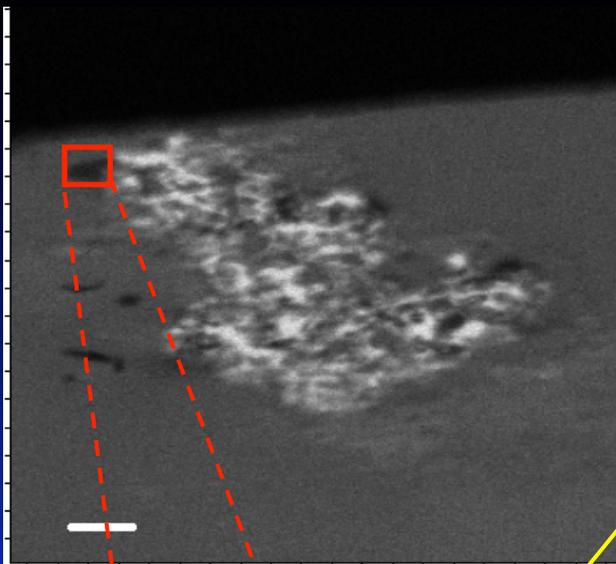
# 彗星塵粒子からの有機炭素の検出



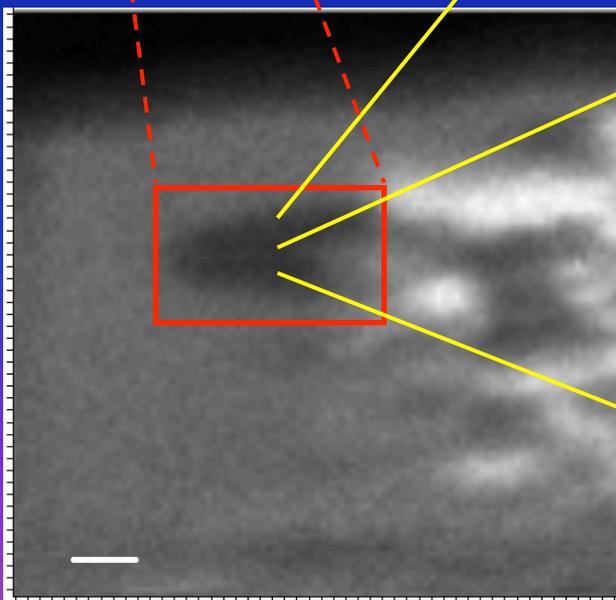
有機炭素:

C1s 吸収端より前のエネルギー(280 eV)では透過し(白)、

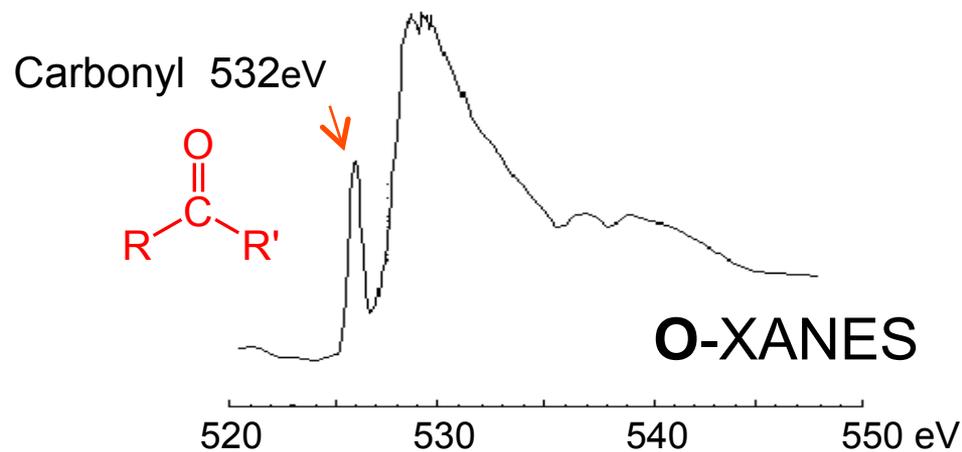
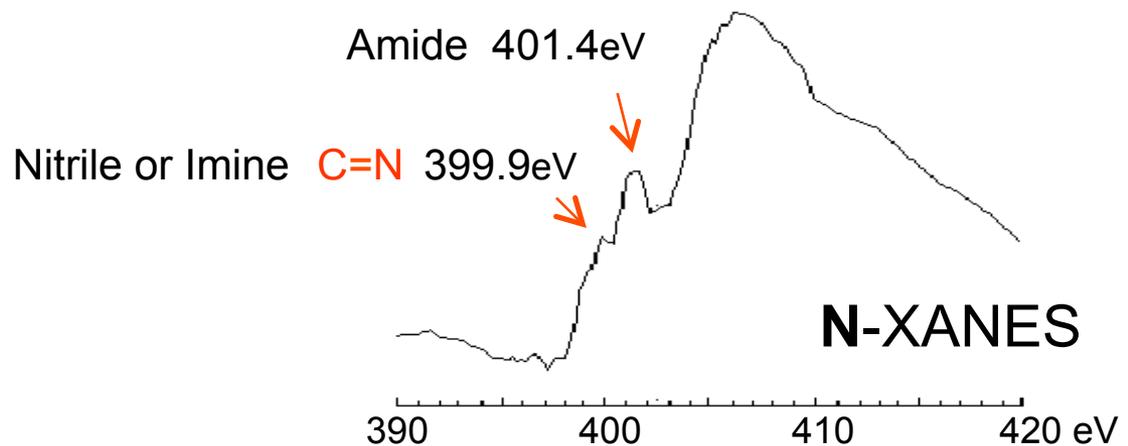
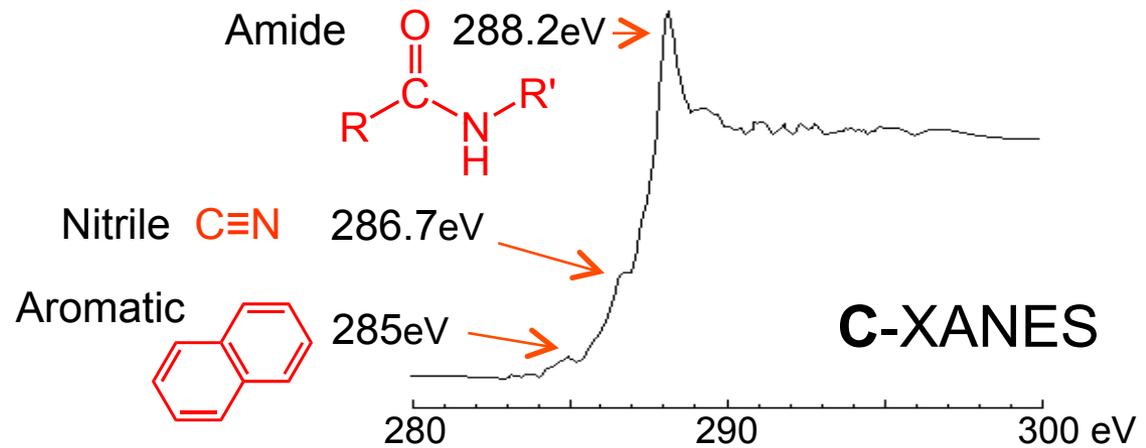
C1s 吸収端以降のエネルギー(290 eV)で吸収する(黒)領域



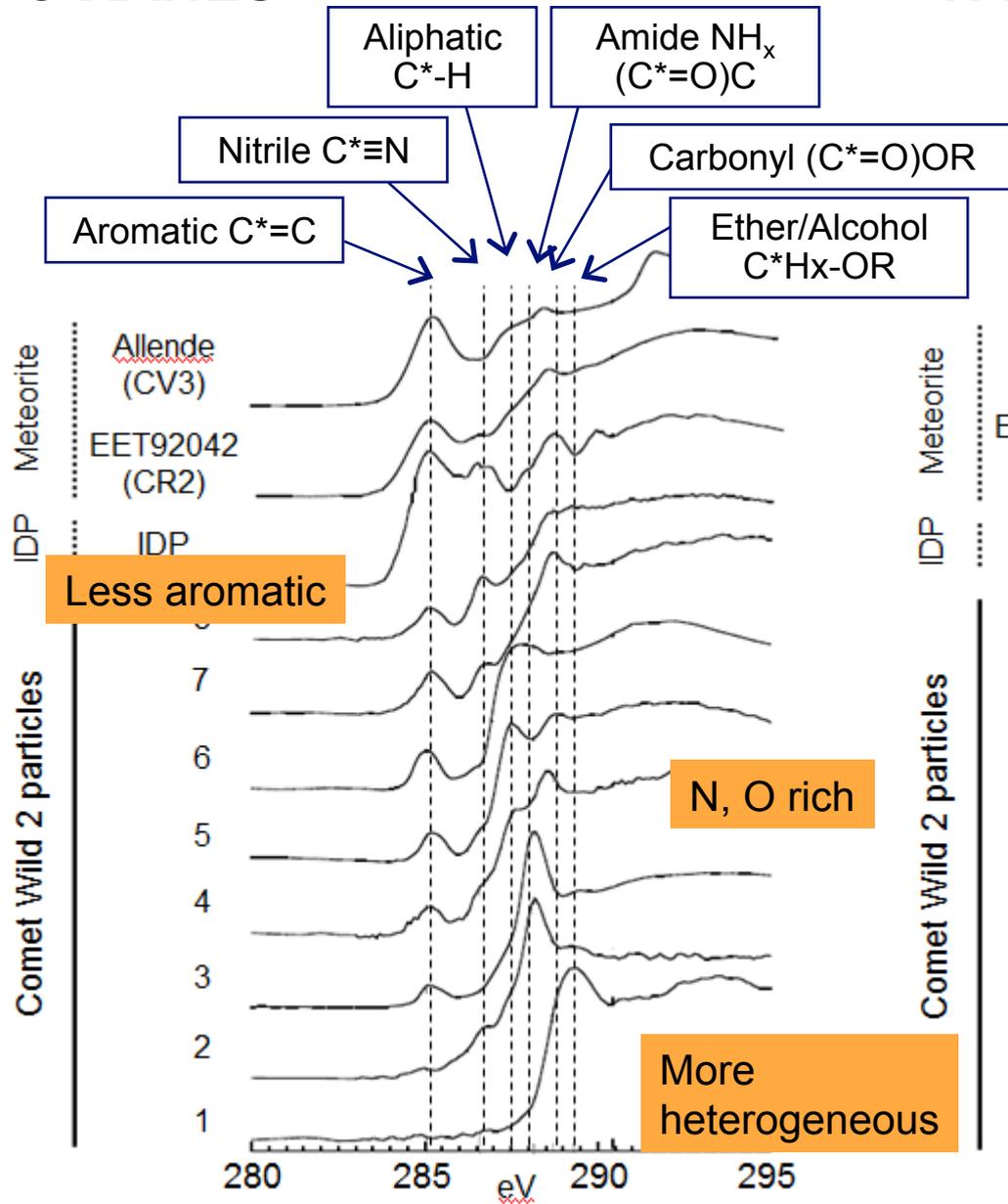
20 x 20  $\mu\text{m}$



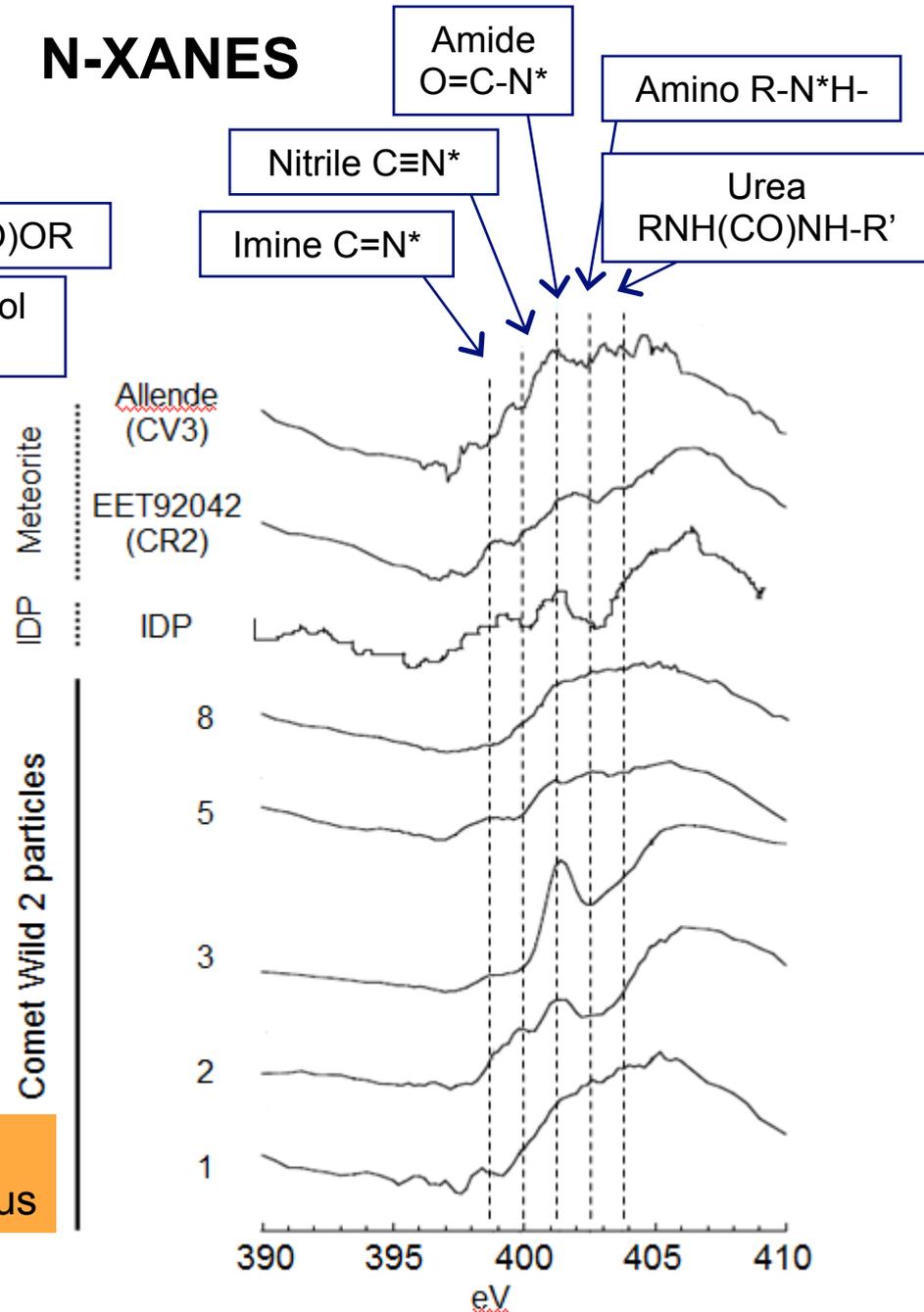
5 x 5  $\mu\text{m}$



# C-XANES

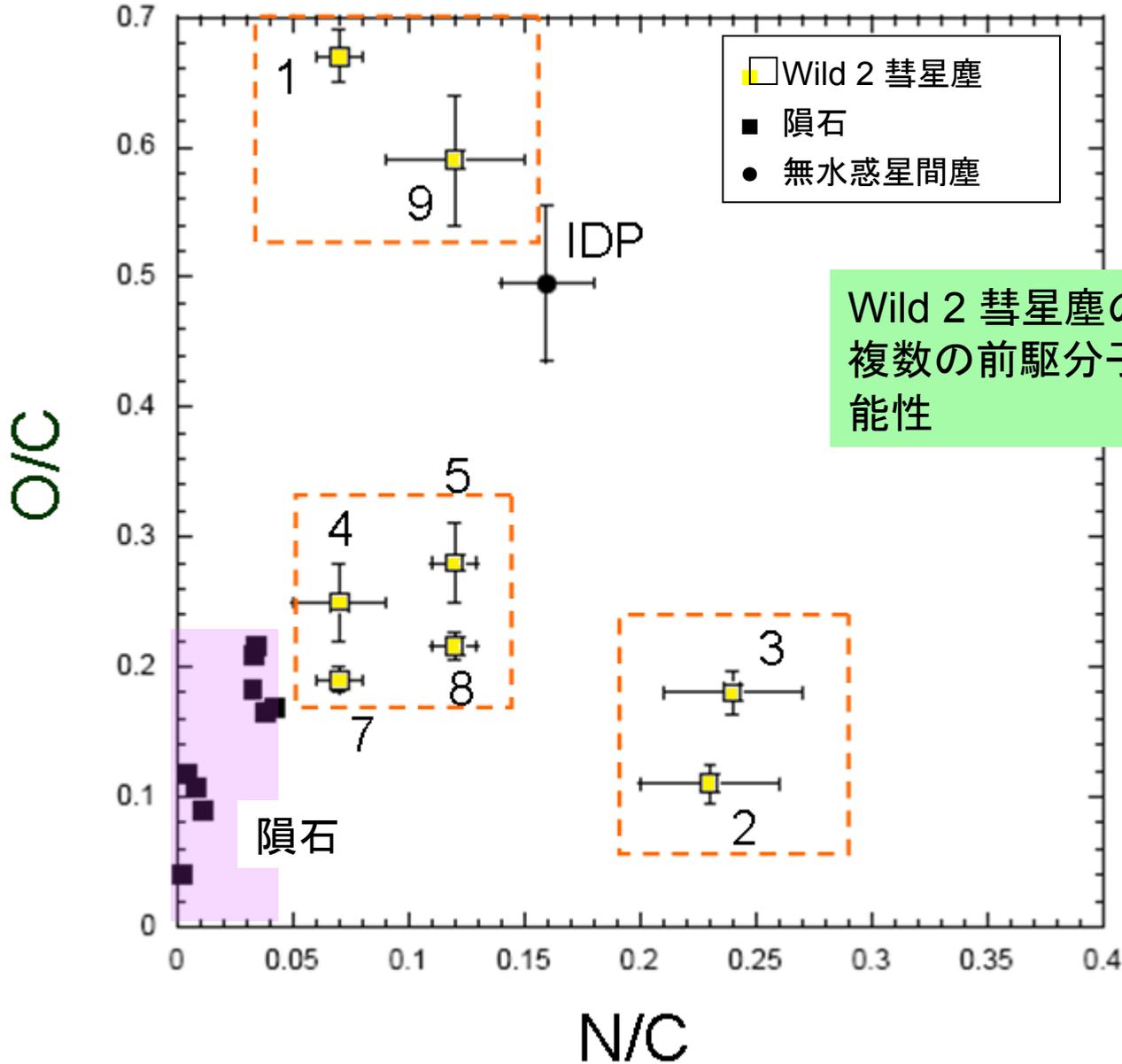


# N-XANES

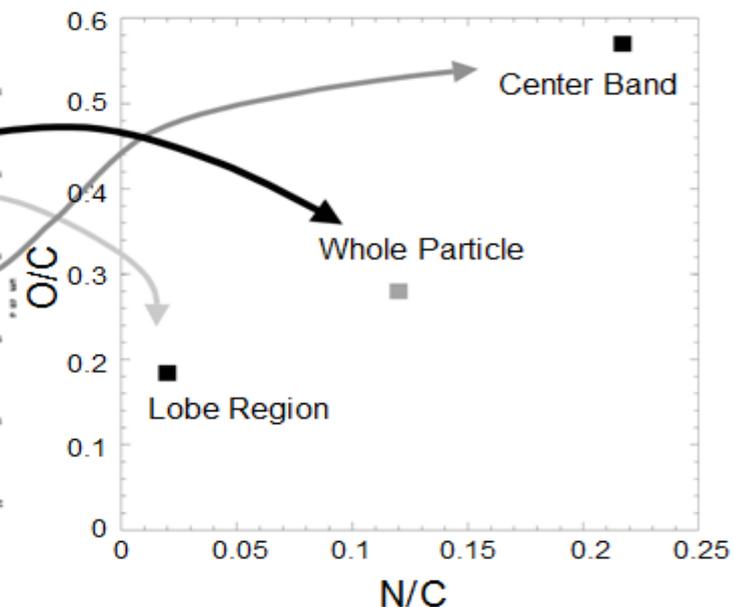
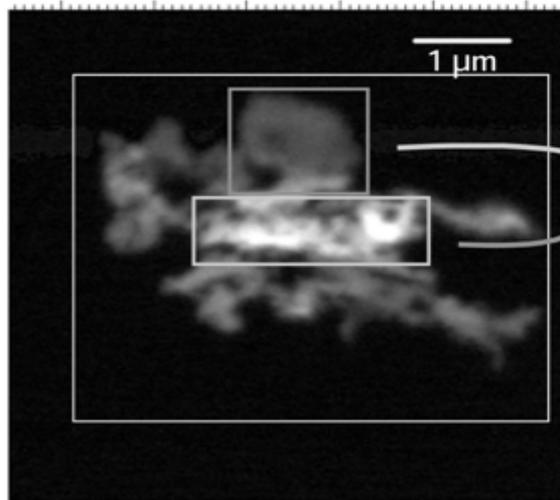


(Cody, Araki, Kilcoyne, Sandford, Yabuta et al. 2008b)

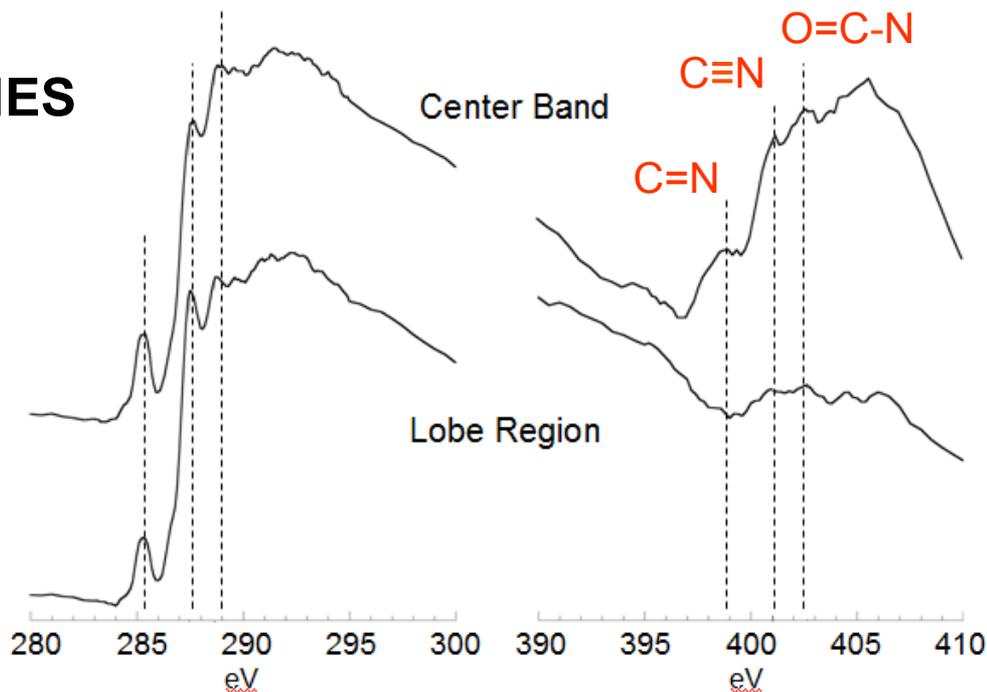
# N/C – O/C プロット



# 彗星塵粒子内での不均一性



## C-XANES



## N-XANES

粒子の中央部と端では、炭素の化学状態は変わらない一方で、窒素官能基に不均一性が見られた

(Cody, Araki, Kilcoyne, Sandford, Yabuta et al. 2008b)

# 日本の始原小天体探査と 将来の宇宙有機物研究

# Astrobiology

The Science That Drives Space Exploration

How does life begin and evolve?

Does life exist elsewhere in the Universe?

What is the future of life on Earth and beyond?

個々の分野の“壁”をとりはらった複合領域

Cosmic dust collection  
on ISS



Release 051101-1 ISAS/JAXA

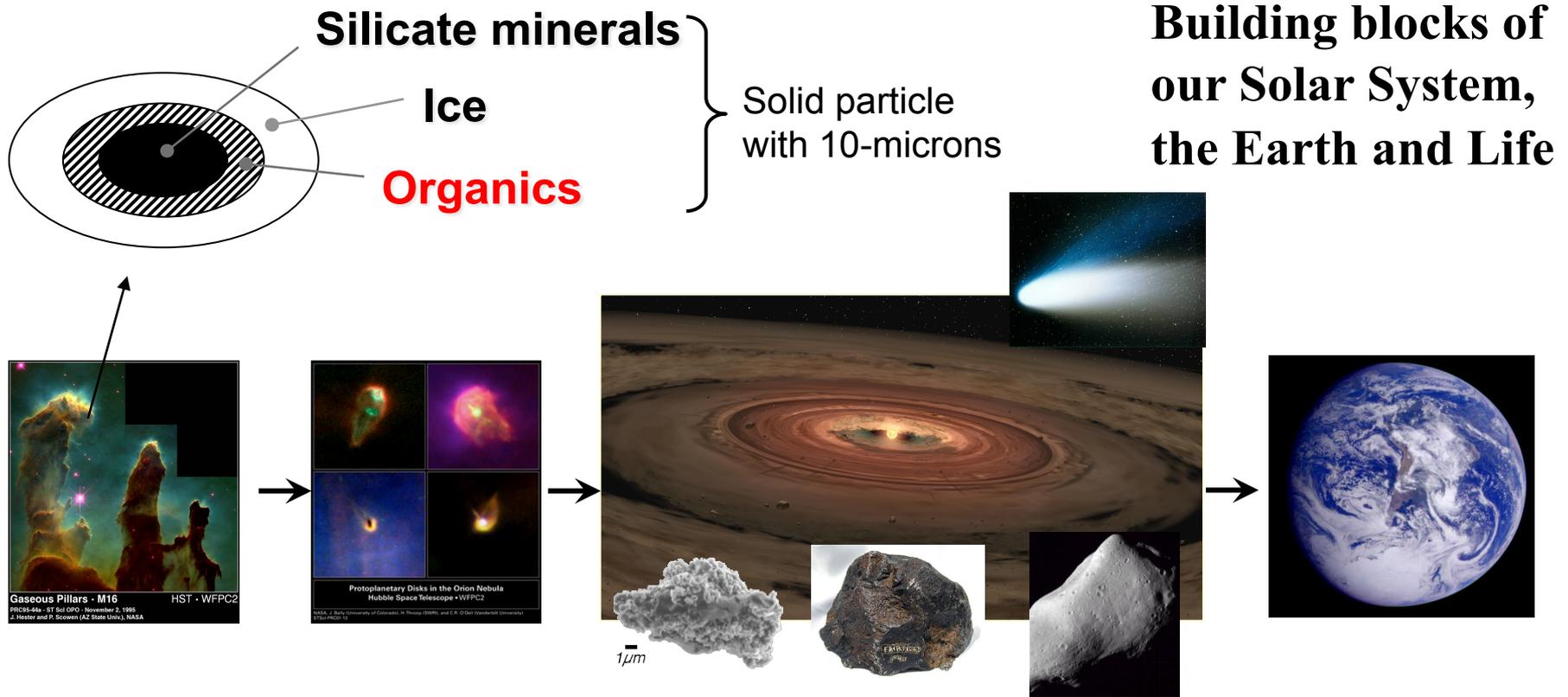
HAYABUSA  
asteroid sample returned  
on June 13, 2010

HAYABUSA 2  
(pre-project)



(Photo and images: JAXA)

# 始原小天体有機物研究のこれから: 物質の相互作用



- ▶ 有機分子は、隕石中のどこに、どのように分布しているのか？
  - ▶ 有機物の、“ありのままの姿”はどのようなか？
  - ▶ 同一試料における、多様性や不均一性はないのか？
- 分離操作を必要としない、その場分析開発が必要

# その場分析 vs. 分離したIOM

Aromatic or Olefinic C\*=C  
1s - $\pi^*$  でエネルギーシフト  
→ 芳香環の数や結合様式、  
H, O, N, S 原子の割合が  
異なる

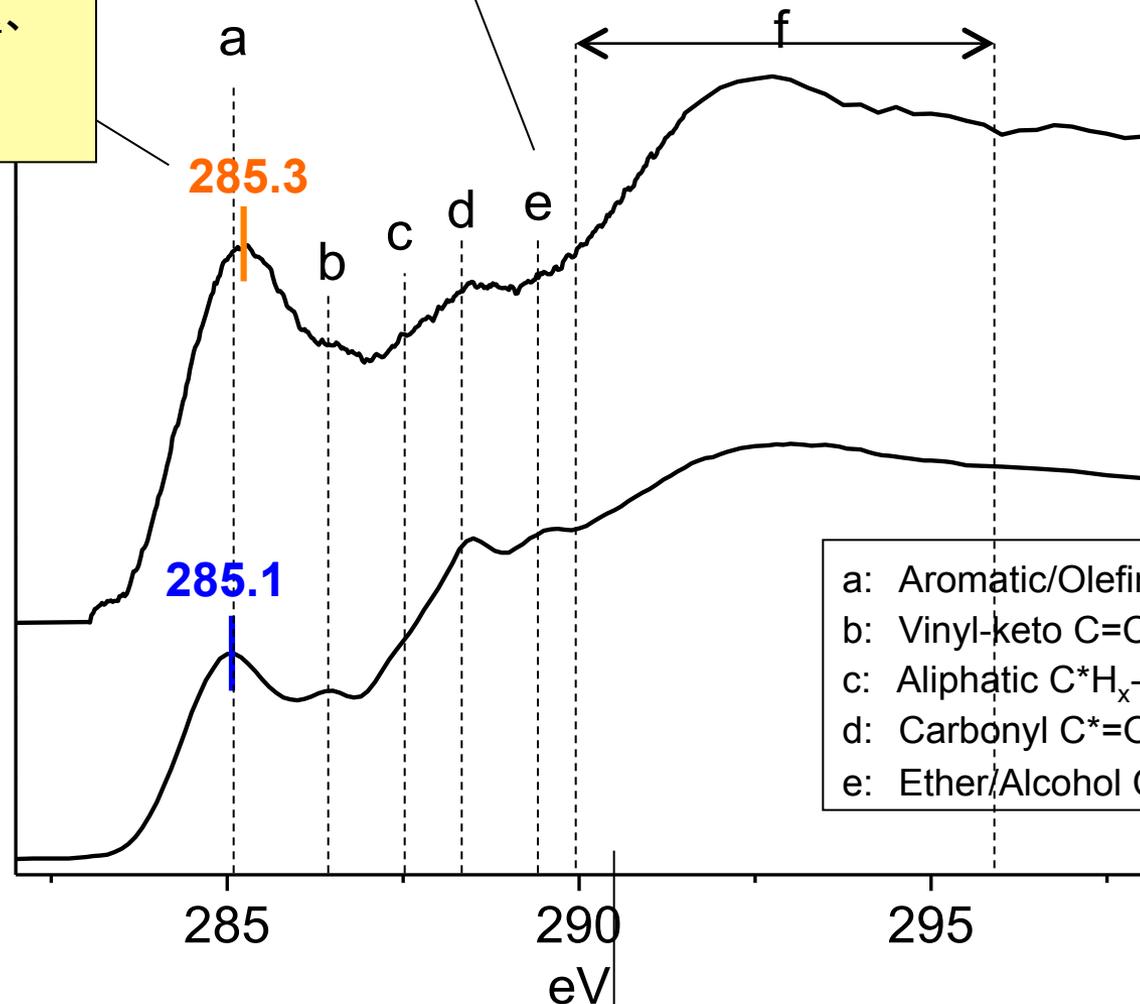
Bulk #1の方が、  
芳香族(不飽和)炭素  
のピーク強度が高い

**Murchison Bulk #1  
(This study)**

Murchison IOM  
(Cody et al.2008)

バルクにはC-O  
(ピーク e)がない

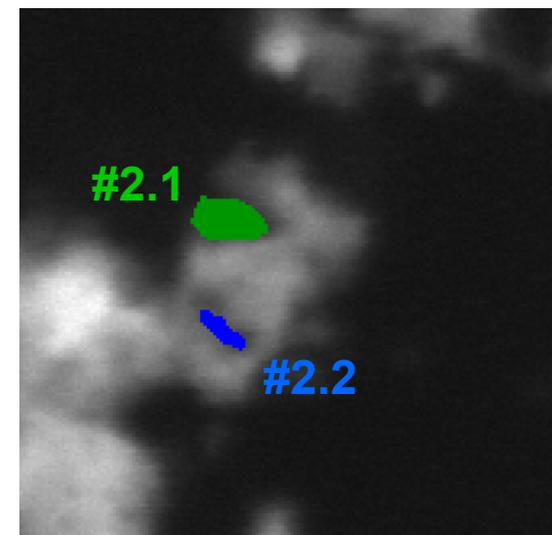
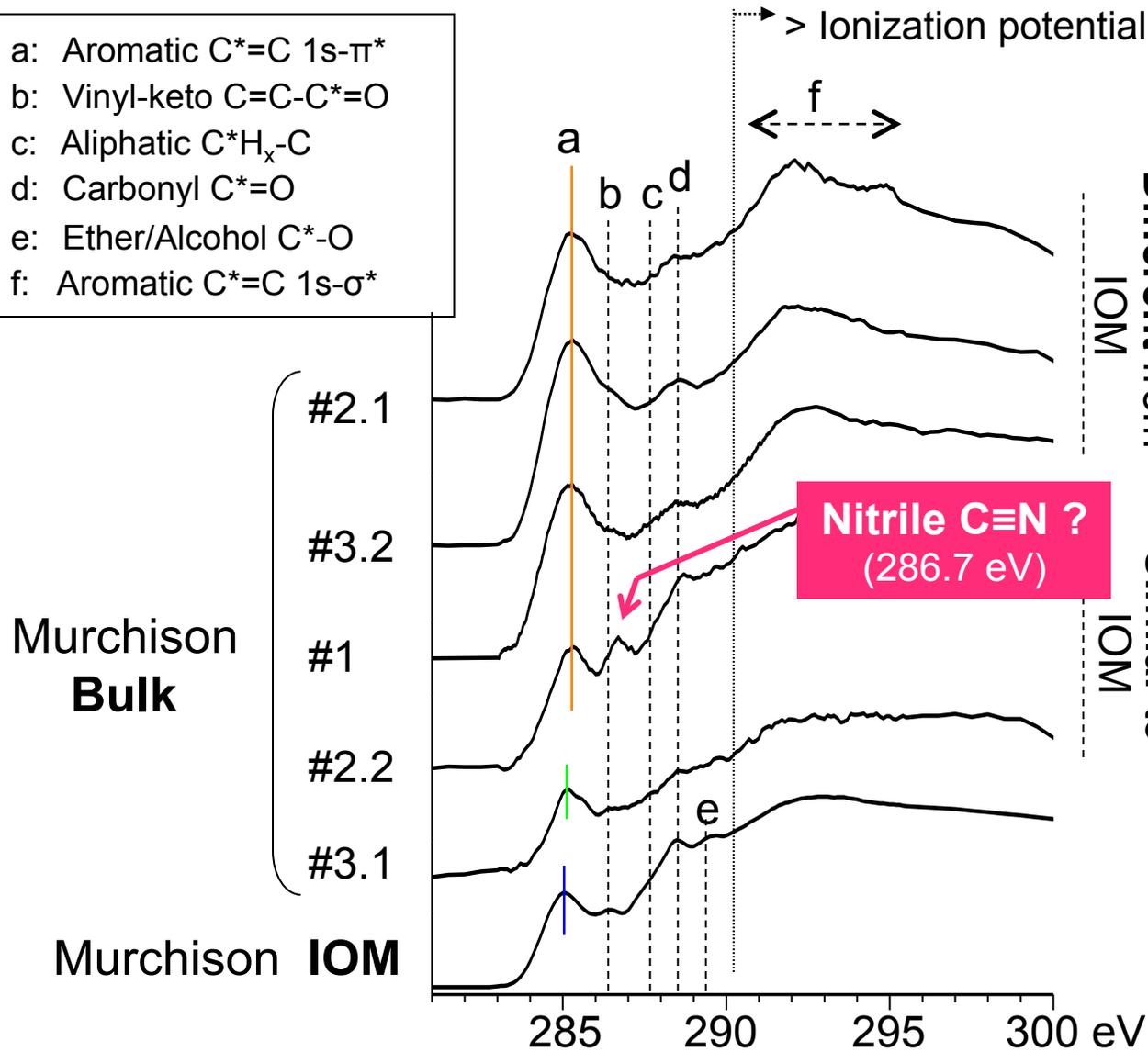
Aromatic C=C\*  
1s - $\sigma^*$   
(290-296 eV)



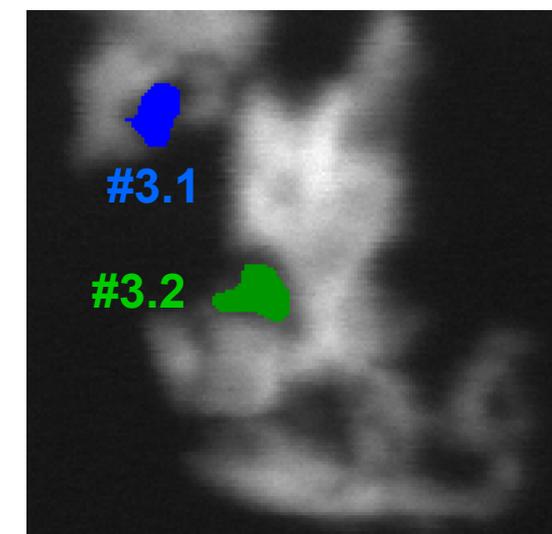
- a: Aromatic/Olefinic C\*=C
- b: Vinyl-keto C=C-C\*=O
- c: Aliphatic C\*H<sub>x</sub>-C
- d: Carbonyl C\*=O
- e: Ether/Alcohol C\*-O

> Ionization potential

# 直接分析により見出される同一隕石中の有機物の多様性



Optical density image 2 x 2  $\mu\text{m}$

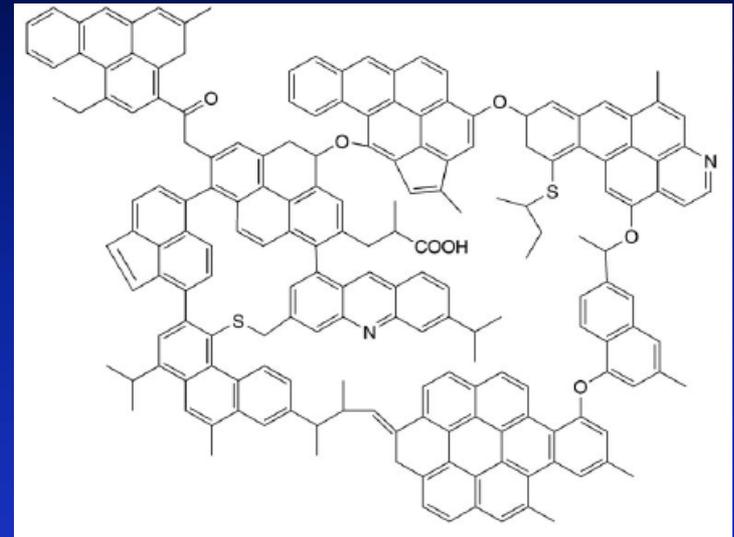


Optical density image 2 x 2  $\mu\text{m}$

# 不溶性高分子有機物の宇宙生命学的研究興味

(生命の起源は、必ずしも現在でいう“生体関連分子”である必要はなかったはず)

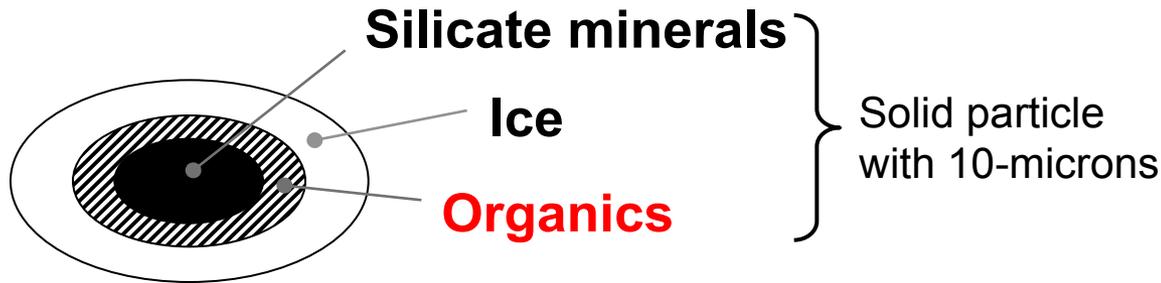
- 隕石有機物の主要成分
- 炭素質コンドライトだけでなく、普通コンドライト、エンスタタイトコンドライトにも普遍に含まれる(0.1–0.3%)
- (たとえばアミノ酸に比べて)分解耐性が高い



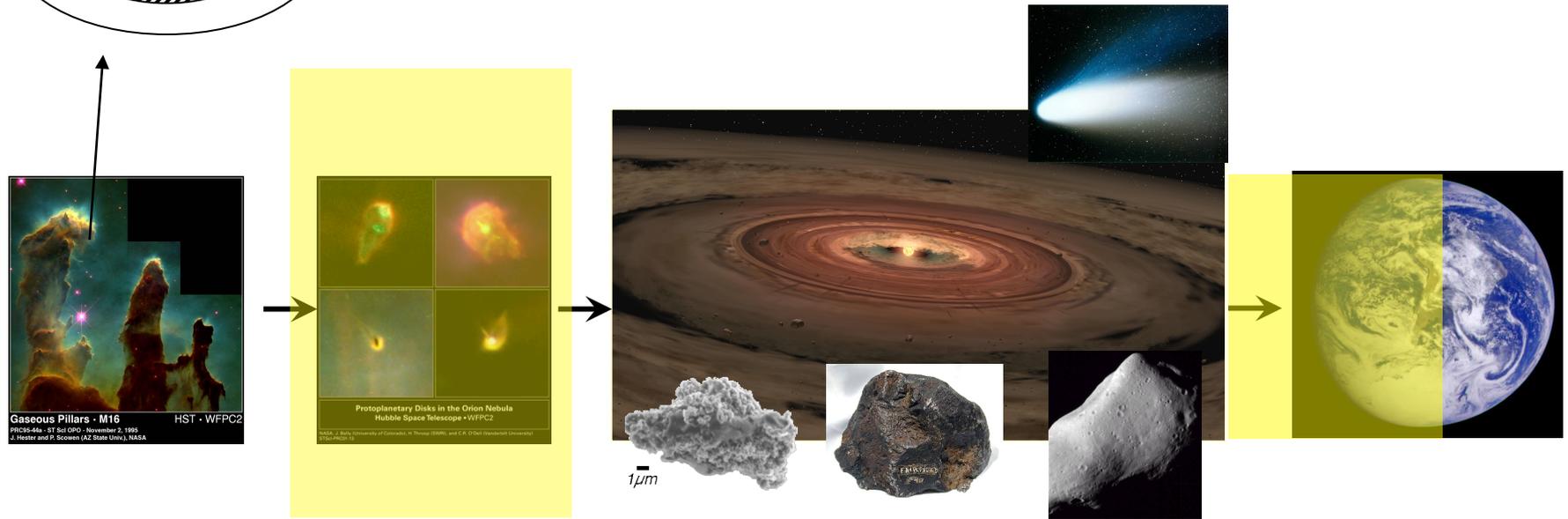
→ 初期地球へ供給された(exogenous)生命原材料物質の有力候補といえる

→ 地球の構成物質となれば(intrinsic)、高分子有機物の大部分が脱ガスに関与し、habitableな初期大気組成を決定した原因となったかもしれない

# 始原小天体有機物研究のこれから: 物質の相互作用



Building blocks of our Solar System, the Earth and Life



**Comprehensive understanding via collaboration of different expertise**