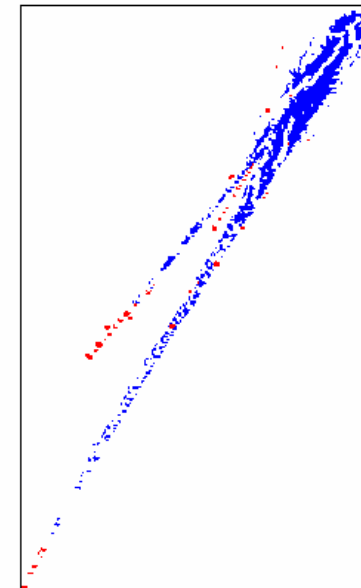
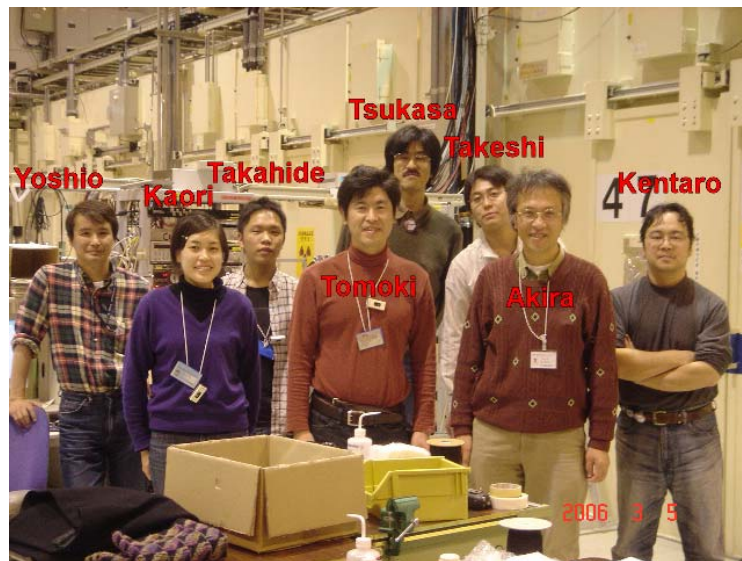


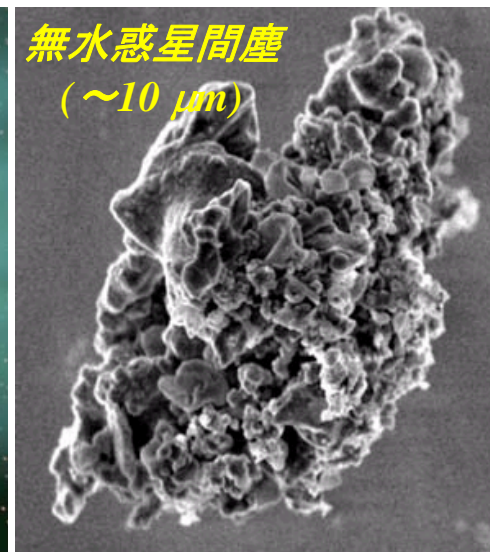
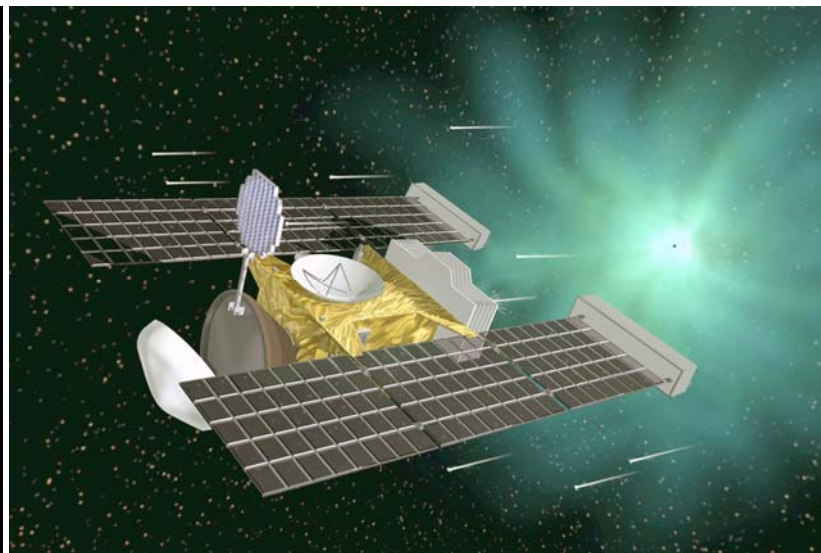
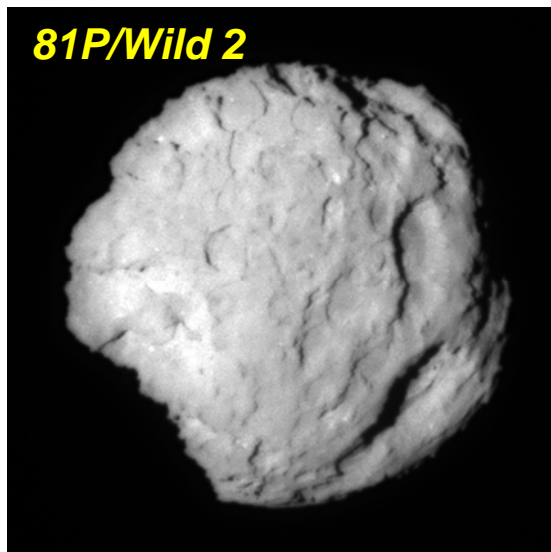
スターダスト衝突トラックの3次元構造と元素分布： 揮発性成分の推定

土山明(阪大・理)、中村智樹(九大・理)、岡崎隆秀(阪大・理)、
上杉健太郎(SPring8)、中野司(産総研)、赤木剛(九大・理)、
飯田洋祐(阪大・理)、城後香里(九大・理)、鈴木芳生(SPring8)



衝撃トラック: skyrocket (C2126,2,68,0)

スターダスト計画



NASA の彗星塵採取計画

打ち上げ	Feb 07, 1999
第1回星間塵採集	Feb-May 2000
第2回星間塵採集	Aug-Dec 2002
彗星 Wild 2 接近	Jan 02, 2004
地球帰還	Jan 15, 2006
初期分析	Jan-Jul, 2006
詳細分析(公募)	Aug, 2006-

目的:

- ・ 太陽系の起源物質をさぐる
- ・ 惑星間塵(IDP)は彗星起源か?
- ・ 生命の起源物質は?
(地球有機物の起源)
- ・ 星間塵の探査

ダストの採取法

シリカエアロゲルによる捕獲

密度 : 5-30 mg/cc

1 x 2 x 3(1) cm³ x 132 セル

衝突速度

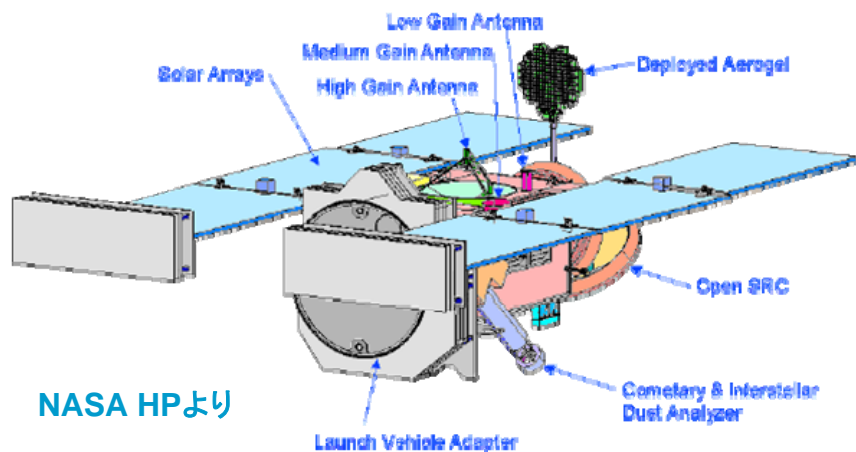
$\Delta V \sim 6.1$ km/sec

ダスト採取

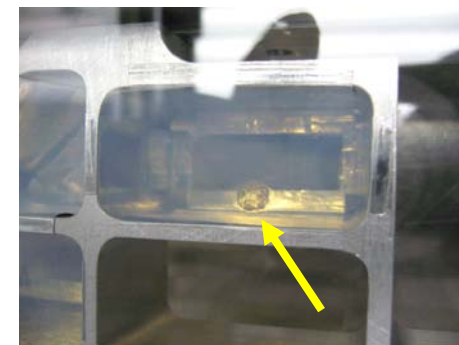
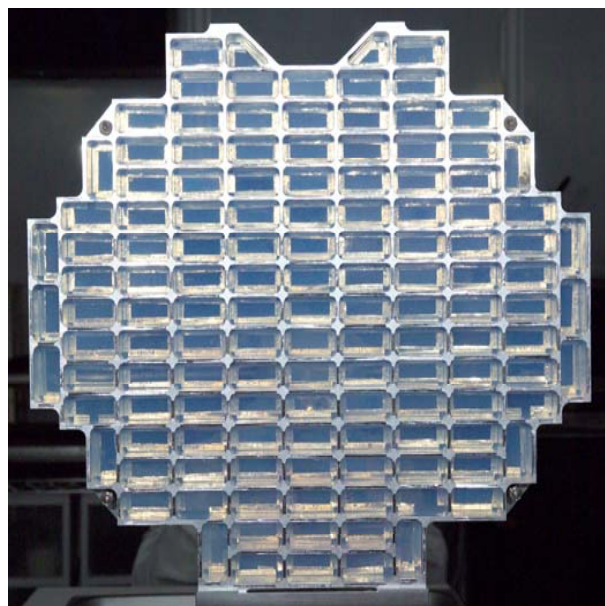
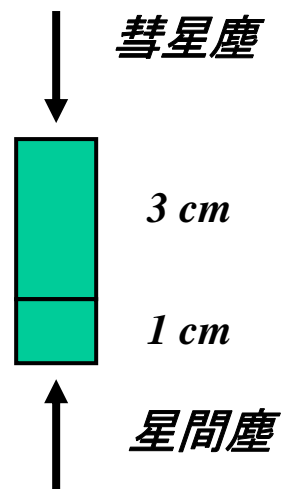
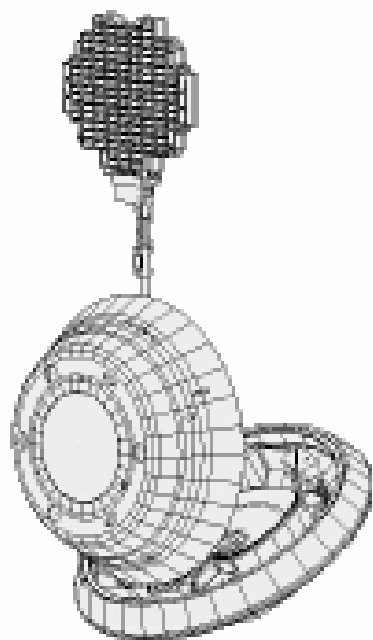
1000 粒子以上

15 μm 以上のサイズ

Encounter Configuration



NASA HPより



keystone



1.1 mm track

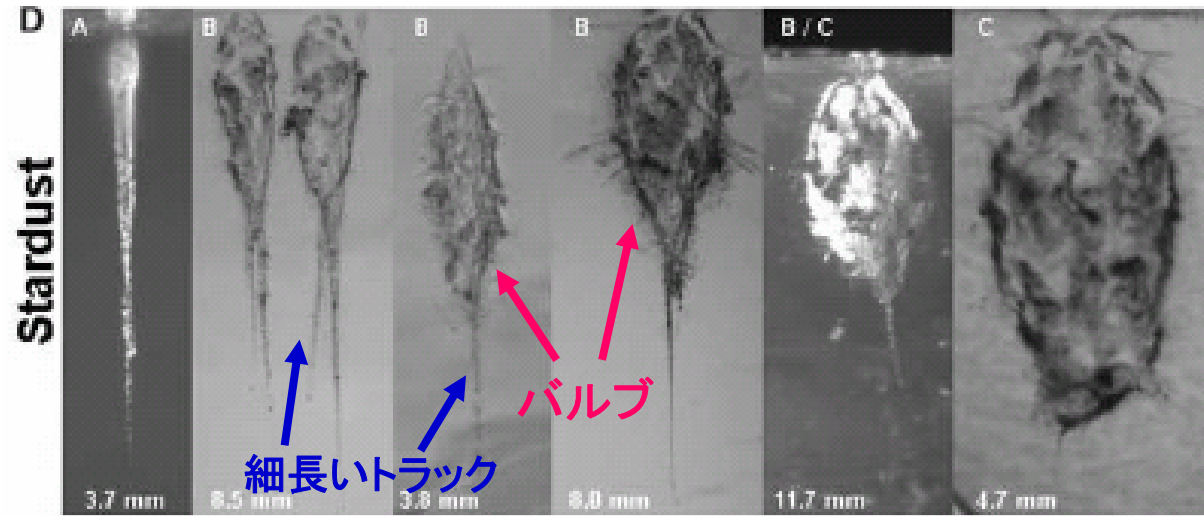
初期分析による成果のまとめ

- ・ 衝突トラック形状の多様性
 - バルブ : 脆くて微細な粒子(ナノサイズ)の集合体が破裂
 - 終端粒子 : 結晶質の粒子(ミクロンサイズ)
- ・ 突入した彗星塵粒子
 - オリジナルな粒子(組織・均質性など)の再構成は困難
 - バルク化学組成はほぼ太陽系における元素存在度
- ・ 高温生成鉱物粒子
 - CAI類似の鉱物粒子など
 - 太陽系の同位体組成
 - ⇒ 中心星近傍の高温領域から外縁の低温領域への物質の混合
- ・ シリカエアロジェルとの反応
 - GEMS*(星間塵候補物質)類似物質の起源?
 - * 金属鉄・硫化鉄微粒子を含む珪酸塩ガラス
- ・ 有機物の発見
 - Nに富む有機物 ⇒ 地球生命との関連?

Ref: Science, Dec 15, 2006

衝突トラックの形状

Hörtz et al. (2006)



強度:小
細い粒子

強度:大
粗い粒子



多様な衝突トラック形状

Bowl

Hedgehog

Stylus

Ginseng

Turnip

Carrot

“Cylinder”

バルブ:

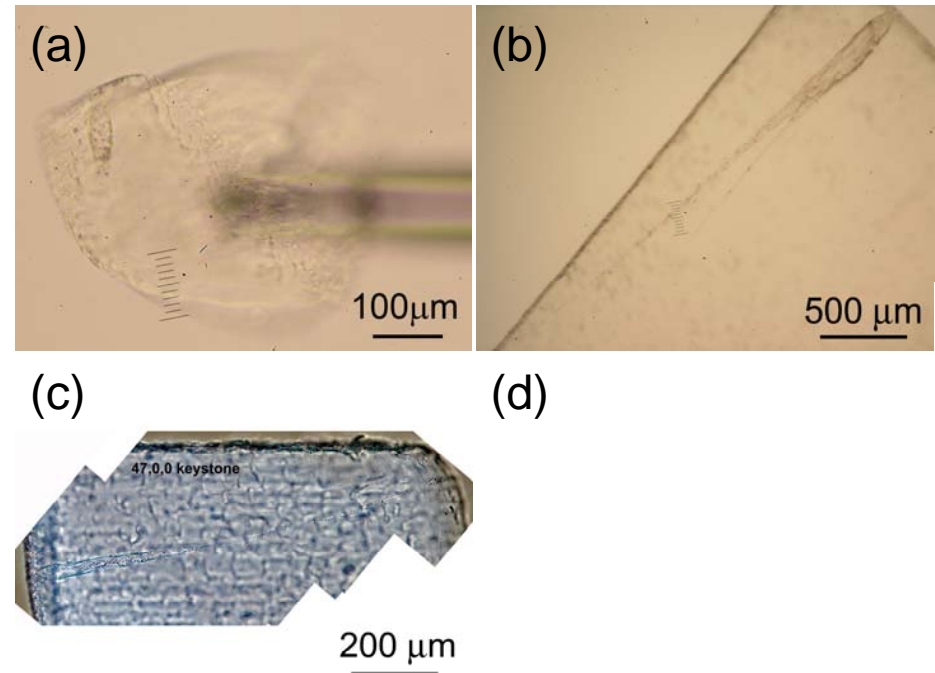
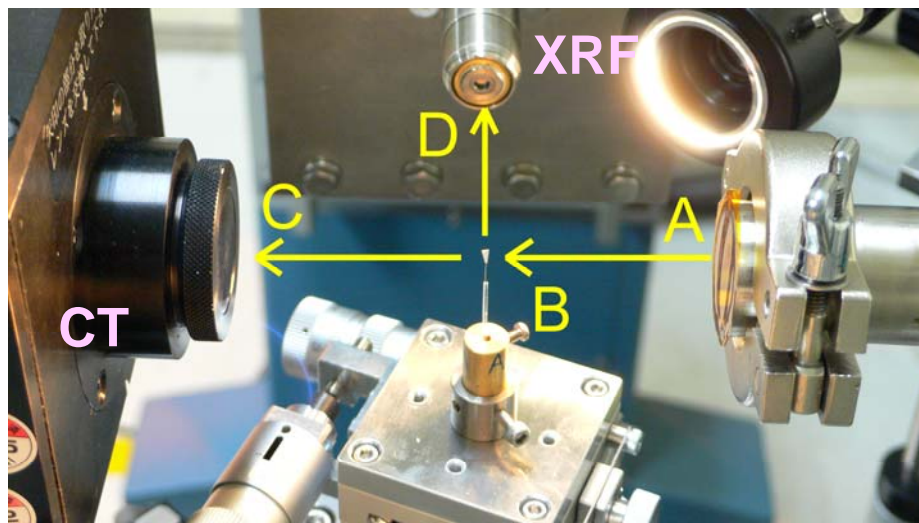
微細粒子 (<1 μ m) の集合体

細長いトラック:

比較的大きな粒子

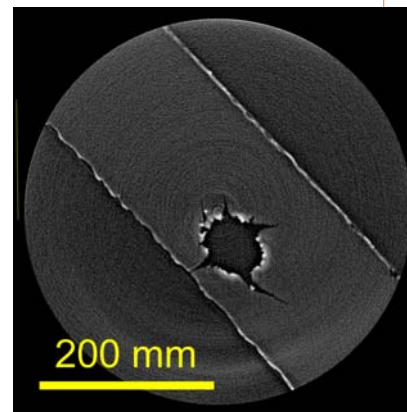
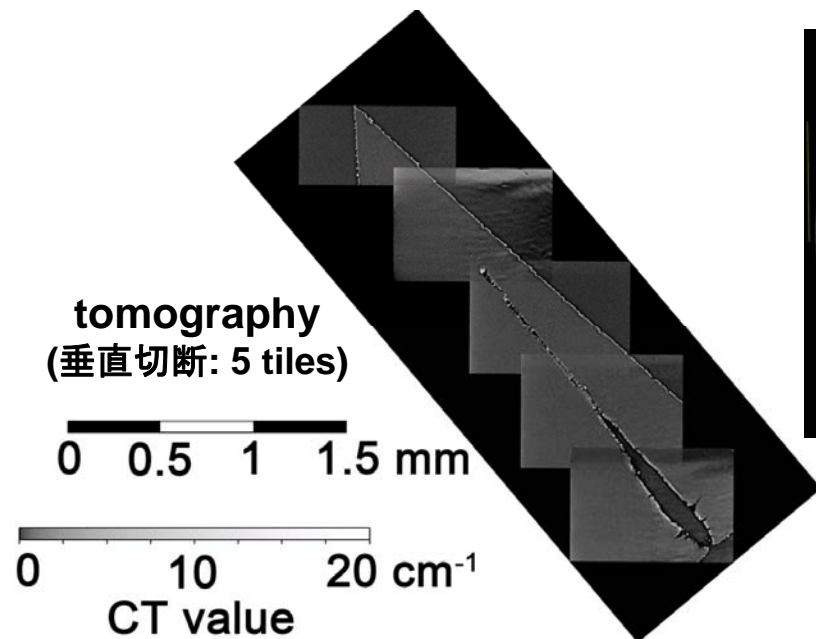
放射光を用いた衝突トラックの分析 (SPring-8)

- ・ サンプル: 4つのキーストーン
 - (a) C2126,1,67,0 (**Namekuji**) 0.1 mm long, bulbous
 - (b) C2126,2,68,0 (**Skyrocket**) 2.8 mm long, bifurcated carrot
 - (c) C2126,4,47,0 (**Gobou**) 0.9 mm long, cylinder to carrot
 - (d) C2017,1,96,0,0 (**Ichiro**) 0.6 mm long, cylinder (new track)
- ・ **Projection tomography** @BL47XU, SPring-8
3次元構造 (0.5 or 0.195 $\mu\text{m}/\text{pixel}$)
- ・ **XRF** @BL47XU, SPring-8
元素組成・分布 (Feほか12元素: S-Se)

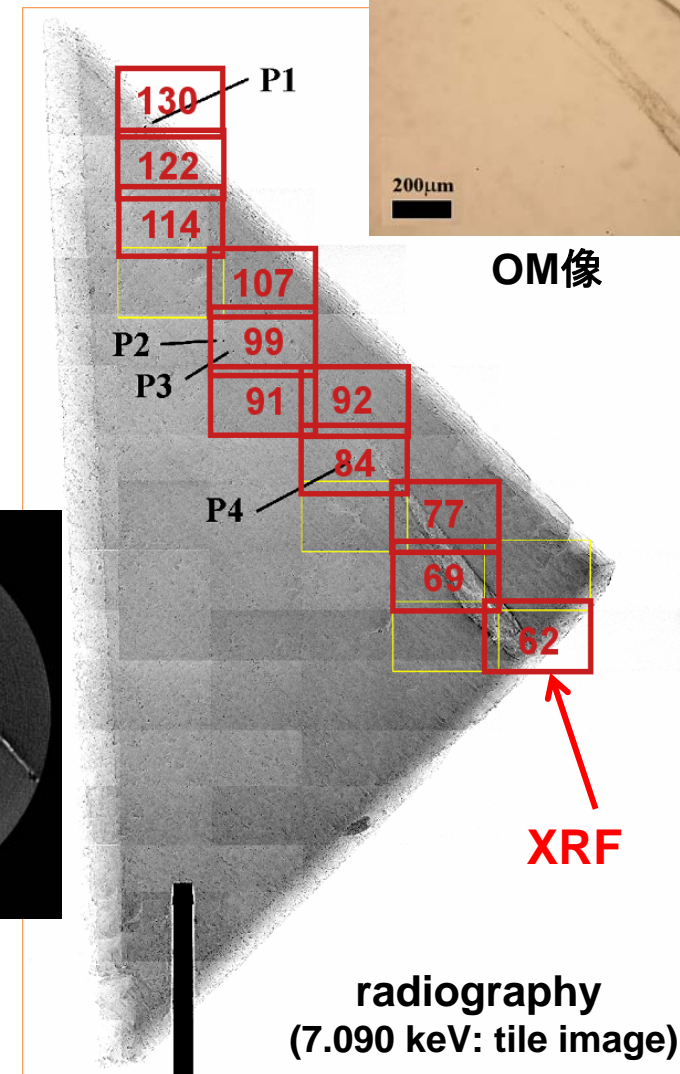


キーストーンの観察・分析(例、Skyrocket)

- (1) 光学顕微鏡(OM)観察
- (2) X線透視像(radiography)観察
キーストーンの2次元全体像
- (3) 蛍光X線分析
領域スキャン:トラック全体をカバー
微細モード:個々の粒子
- (4) X線CT(tomography)
0.195, 0.47 μm /画素
詳細:飯田ら(本セッションポスター)

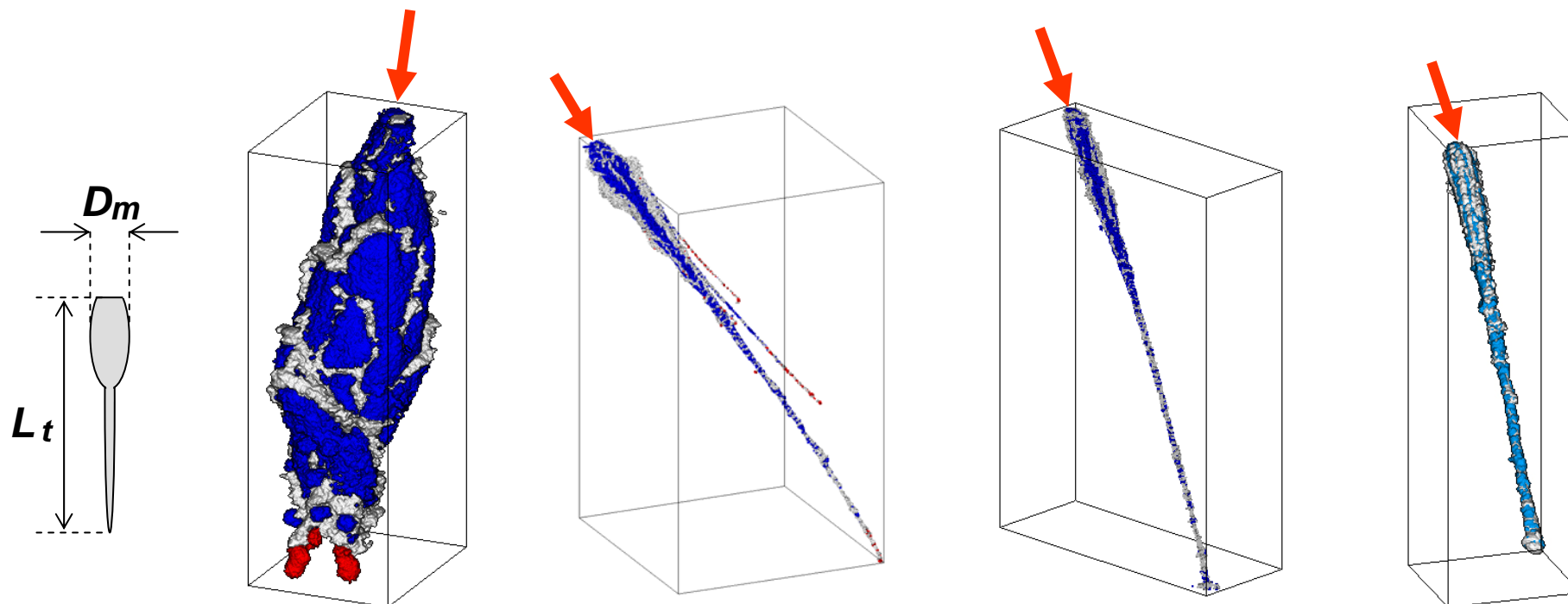


tomography
(CT slice)



Sample: C2126,2,68,0

衝突トラックの定量的な3次元外形と突入粒子の鉄量

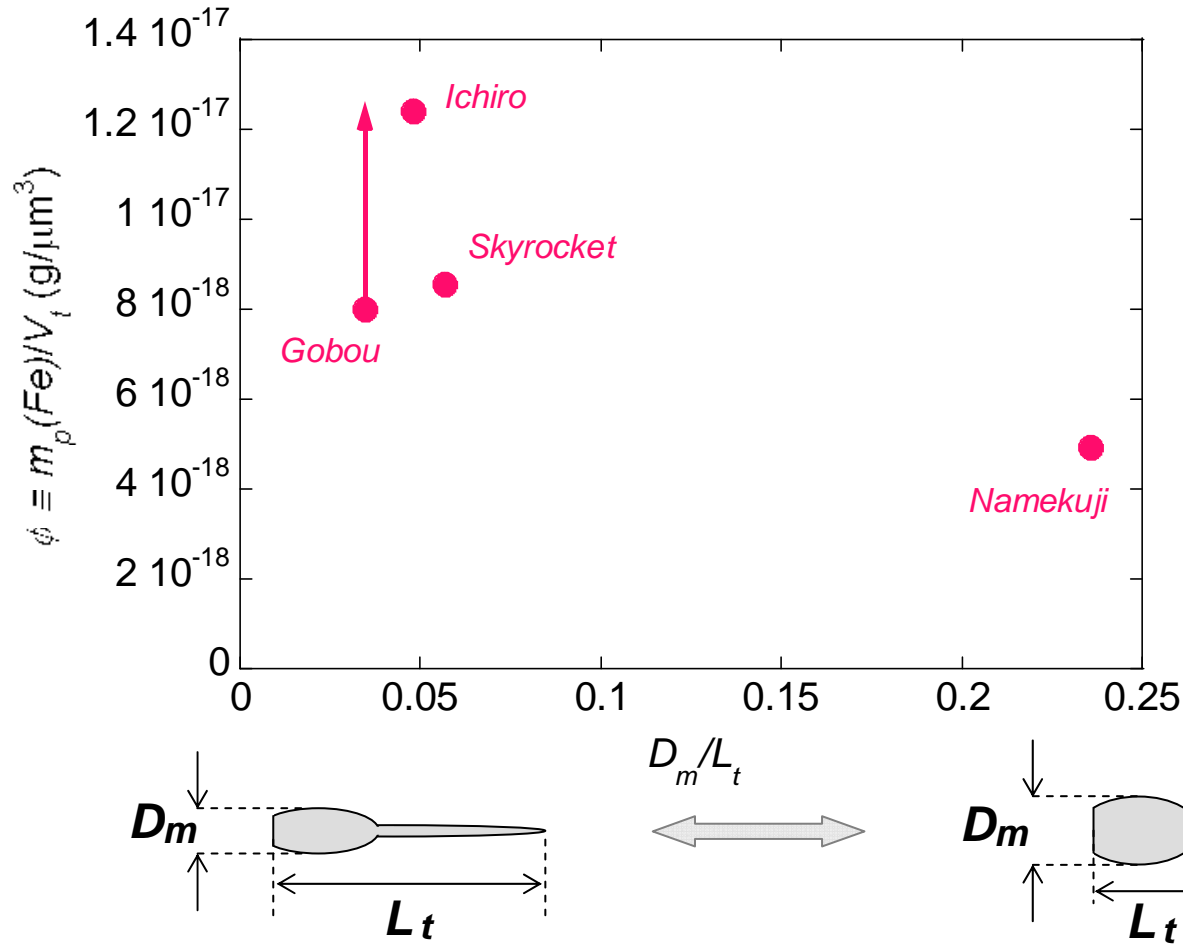


	Namekuji	Skyrocket	Gobou	Ichiro
L_t (μm)	113	2484	>884	614
D_m (μm)	26.9	141	30.4	29.6
V_t (μm^3)	3660	779000	>15700	10400
$m(\text{Fe})_p$ (pg)	0.180	66.6	>>1.26	1.29
m_p (pg)*	0.96	360	>>6.8	6.9

* estimated from $m(\text{Fe})_p$ by assuming CI composition for impactor particle

衝突トラックと突入粒子の比較

衝突速度一定 \Rightarrow 運動エネルギー (E_{kin}) は衝突粒子の質量 (m_p) のみの関数
 仮定: **トラック体積 (V_t) は E_{kin} に比例 $\Rightarrow V_t$ は m_p に比例 $\Rightarrow V_t$ は $m(Fe)_p$ に比例**



$m(Fe)_p/V_t$: 衝突トラック形状により変化、 D_m/L_t と逆相関
 \Rightarrow **ズングリしているほど揮発性成分(有機物、氷?)が多い**

彗星塵の3成分モデルと衝突トラック体積の推定

- ・ 彗星塵の3成分モデル (Greenberg 粒子も参考)

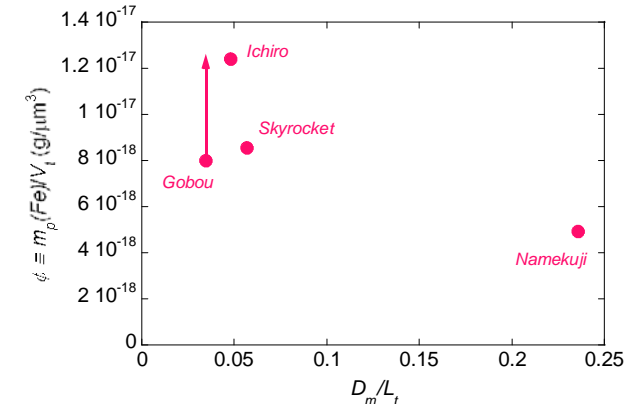
Component	Mass	Fe content	Efficiency to from track
Matrix (fragile, IDP-like)	m_1	w_1	A_1
Crystalline (coarse grains)	m_2	w_2	A_2
Volatile (organics, ice?)	m_3	$w_3(=0)$	A_3

突入粒子の質量: $m_p = m_1 + m_2 + m_3$

突入粒子の全鉄量: $m(\text{Fe})_p = w_1 m_1 + w_2 m_2$

衝突トラックの体積: $V_t = A_1 m_1 + A_2 m_2 + A_3 m_3$
 ($A_3 > A_1 > A_2$)

全鉄量/体積比 $\phi \equiv m(\text{Fe})_p / V_t$



- ・ 各衝突トラックの特徴

Namekuji: $m_{2,N} = 0$ (no crystalline grain)

Skyrocket: $m_{2,S} / m_{1,S} \sim 1.56$ (XRFより)

Gobou: $m_{2,G} = 0$ (みかけ上: 終端粒子欠落)

$$\phi_S / \phi_N = 1.73$$

$$\phi'_G / \phi_N = 1.63 < \phi_G / \phi_N$$

Volatile component がない場合 ($m_3=0$)

- Skyrocket vs. Namekuji: $\phi_S/\phi_N = 1.73$

$$\frac{\phi_S}{\phi_N} = \frac{\frac{m_{1,S}}{m_{p,S}} + \frac{w_2}{w_1} \left(1 - \frac{m_{1,S}}{m_{p,S}}\right)}{\frac{m_{1,S}}{m_{p,S}} + \frac{A_2}{A_1} \left(1 - \frac{m_{1,S}}{m_{p,S}}\right)}$$

ϕ_S/ϕ_N as a function of A_2/A_1 and w_2/w_1 for $m_3=0$ and $m_{p,S}/m_{1,S} \sim 1.56$.

	$w_2/w_1=0$	1	1.5	2
$A_2/A_1=0$	1.00	1.56	1.84	2.13
1/10	0.95	1.48	1.75	2.01
1/3	0.84	1.32	1.55	1.79
1	0.64	1.00	1.18	1.36

$w_1 < w_2$ でないと $\phi_S/\phi_N = 1.73$ を説明できない (一般には $w_1 \geq w_2$)

1: Matrix
2: Crystalline
3: Volatile

- Gobou vs. Namekuji: $\phi'_G/\phi_N = 1.63$ ($< \phi_G/\phi_N$)

$$\frac{\phi'_G}{\phi_N} = \frac{1}{1 + \frac{A_2}{A_1} \left(\frac{m_{p,G}}{m_{1,G}} - 1 \right)} \Rightarrow \frac{m_{p,G}}{m_{1,G}} - 1 = \frac{A_2}{A_1} \left(\frac{\phi_N}{\phi'_G} - 1 \right)$$

$A_2/A_1 > 0, \phi'_G/\phi_N - 1 < 0 \Rightarrow m_{p,G} < m_{1,G}$: これはありえない

⇒ volatile component がないとデータを説明できない ($m_3 > 0$)

Volatile component あり ($m_3 > 0$): $A_2 < A_1 \ll A_3$ の場合

- Skyrocket vs. Namekuji: $\phi_S/\phi_N = 1.73$

$$\frac{\phi_S}{\phi_N} \approx \frac{\frac{m_{p,S}}{m_{3,S}} - 1 + \left(\frac{w_2}{w_1} - 1 \right) \frac{m_{2,S}}{m_{3,S}}}{\frac{m_{p,N}}{m_{3,N}} - 1}$$

1: Matrix
2: Crystalline
3: Volatile

$w_1 \geq w_2$ のときには、 $m_{3,N}/m_{p,N} > m_{3,S}/m_{p,S}$ ($\because \phi_S/\phi_N > 1$)

⇒ Namekuji は Skyrocket より volatile component に富む

- Gobou vs. Namekuji: $\phi'_G/\phi_N = 1.63$ ($< \phi_G/\phi_N$)

$$\frac{\phi'_G}{\phi_N} = \frac{\frac{m_{p,G}}{m_{3,G}} - 1}{\frac{m_{p,N}}{m_{3,N}} - 1}$$

常に、 $m_{3,N}/m_{p,N} > m_{3,G}/m_{p,G}$ ($\because \phi'_G/\phi_N > 1$)

⇒ Namekuji は Gobou より volatile component に富む

Volatile component あり ($m_3 > 0$): $A_2 = A_1 = A_3$ の場合

- Skyrocket vs. Namekuji: $\phi_S / \phi_N = 1.73$

$$\frac{\phi_S}{\phi_N} \approx \frac{1 - \frac{m_{3,S}}{m_{p,S}} + \left(\frac{w_2}{w_1} - 1 \right) \frac{m_{2,S}}{m_{p,S}}}{1 - \frac{m_{3,N}}{m_{p,N}}}$$

1: Matrix
2: Crystalline
3: Volatile

$w_1 \geq w_2$ のときには、 $m_{3,N} / m_{p,N} > m_{3,S} / m_{p,S}$ ($\because \phi_S / \phi_N > 1$)

⇒ Namekuji は Skyrocket より volatile component に富む

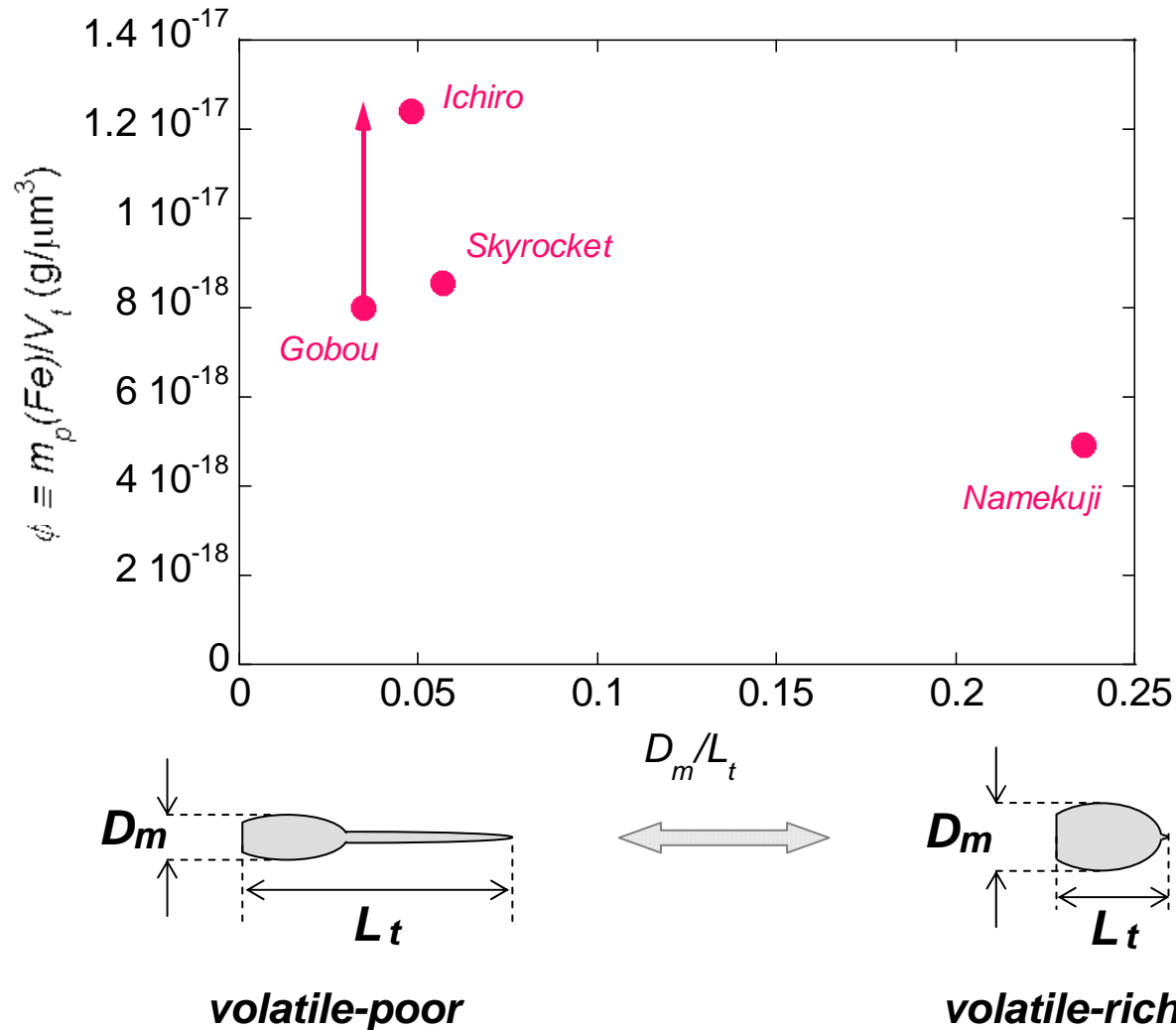
- Gobou vs. Namekuji: $\phi'_G / \phi_N = 1.63$ ($< \phi_G / \phi_N$)

$$\frac{\phi'_G}{\phi_N} = \frac{1 - \frac{m_{3,G}}{m_{p,G}}}{1 + \frac{m_{3,N}}{m_{p,N}}}$$

常に、 $m_{3,N} / m_{p,N} > m_{3,G} / m_{p,G}$ ($\because \phi'_G / \phi_N > 1$)

⇒ Namekuji は Gobou より volatile component に富む

衝突トラックと突入粒子の比較



$m(\text{Fe})_p/V_t$: 衝突トラック形状により変化、 D_m/L_t と逆相関
 ⇒ ズングリしているほど揮発性成分(有機物、氷?)が多い

まとめ

- 突入粒子の全鉄量とトラック体積の比: $m(\text{Fe})_p/V_t$
多様なトラック形状と相関を示す(4 tracks)
突入粒子に含まれていた揮発性成分(氷?、有機物)の量の指標
ズングリしたトラックほど揮発性成分が多い
- トラックの定量的な3次元構造と元素組成(突入粒子質量の推定)
トラック形成の物理モデルを構築するためデータ
突入した彗星塵を再構成する重要な手がかり
飯田ら(本セッション・ポスター)
- 今後の課題
形状の異なる多くのトラック
トラック形成の物理モデル
彗星塵の再構成

トラックに沿った元素分布 (Fe/Cl-normalized)

