

流星科学の最前線

流星－彗星，小惑星の熱的進化に迫る

春日敏測¹

1. 流星の科学的意義

“夜空を駆ける流れ星。

彼らの一瞬の輝きには、太陽系創成時の壮大なドラマが秘められているのだ。”

本稿では、流星群分光観測が明らかにしてきた流星塵・彗星塵、小惑星塵の熱的進化について紹介する。

太陽系の起源と進化を調べる上で、彗星や小惑星の金属組成比を知ることが重要である。両者の比較から、それぞれの天体が経て来た熱的進化・風化過程を推定できるからである。しかし、問題があった。金属組成比の情報を得る手段が、非常に限られていた点である。大規模な計画による探査、あるいは太陽をかすめる彗星(Sun-grazer)は、どちらも希な調査機会である。Sun-grazerでは、太陽熱によって塵に含まれる金属が蒸発し、金属組成比が推定可能である。だが、そのような彗星の観測は、太陽離角が非常に小さなところで行う必要があるため難しい。また、そうしたサンプルも少ない。小惑星についても、表層面の観測では金属組成比の調査は容易でない。いずれにせよ、始原天体の金属組成比を得ることは困難であった。

解決方法として、流星に着目した。その正体は、始原天体起源であり地球に流入している塵だ。流星群に属する流星の塵は、その多くがどの彗星あるいは小惑星から放出されたものであるかが知られている。そのため、流星観測は巨額な費用を必要としない天然の始原天体探査手段と考えることができる。高温で発光す

る流星塵の組成比、特に金属組成比を明らかにすることは重要である。

2. 流星群と母天体

2.1 流星群の分光観測:金属組成比

比較的大きなサイズの塵(流星体)が宇宙から地球に高速で飛び込んでくると、大気との衝撃により加熱される。融け始めた流星体の周辺にプラズマ雲が生成され、発光する現象が流星である。彗星や小惑星を起源とする流星体が群をなして地球へ突入してくる場合に、流星群が起こる(e.g. [1])。

流星を分光すると、流星体に含まれる成分や地球大気成分が観測される。紫外から可視波長領域(300-600nm)では、主に流星体起源の金属元素輝線が観測される。例えば、中性金属原子ではMgI (518nm), FeI (374nmなど多数), CaI (423nm), NaI (589nm) など、イオンではCaII (393,396nm)

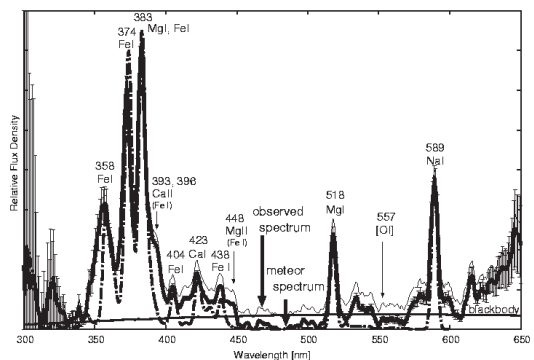


図1: しし座流星群の流星スペクトル(2002年11月19日UT)。破線は原子輝線のモデルスペクトルを表す。(励起温度5500K, 黒体温度5250 ± 250K)。

1. 自然科学研究機構国立天文台 RISE 推進室

やMgII (448nm) である。例として、しし座流星群の流星スペクトルを示した(図.1 [2,3])。輝線の相対比から中性原子比と電離状態を考慮して、最終的に金属組成比を得ることができる。

2.2 流星群の母天体:彗星と小惑星

彗星は揮発性物質を多く含み、太陽系外縁部に存在する微惑星の生き残りであると考えられている。太陽加熱の影響が極めて小さく、太陽系形成初期の情報を保存していると考えられている。一方、小惑星は火星と木星の軌道の間にあり、そのほとんどが岩石質の状態です。太陽系誕生の頃の姿をとどめていると考えられている。彗星と小惑星は、まったく異なる起源という認識であった。しかし、彗星が熱的に進化した結果、小惑星へと変遷する可能性も示唆されている。

彗星は、揮発性物質を蒸発し尽くしてしまうと、分裂・崩壊を繰り返しながら消失すると考えられている。例として、2006年5月のシュヴァスマン・ヴァハマン第3彗星(73P/Schwassmann-Wachmann)、2000年夏に分裂・消失したリニア彗星(C/1999S4)や、19世紀に分裂を繰り返した末に行方不明になり大流星雨を降らせたビエラ彗星(3D/Biela)などが挙げられる。しかしながら、彗星はすべてが消失してしまうわけではないようだ。

彗星に含まれる揮発性物質の枯渇がすすむと、不揮発性物質が残る可能性も示唆されている[4]。彗星が見かけ上小惑星のように変成していったと考えられる枯渇彗星だ。なかには、彗星の特徴である流星群を伴っているものさえある。例えば、ふたご座流星群の母天体、小惑星(3200)フェートンがその例である。ただ、小惑星のような天体でも、衝突によって流星群を生み出すことが可能ともいわれている。小惑星(3200)フェートンが彗星だったかどうかは、まだ決着がついていない。

彗星は、小惑星へと変遷するのだろうか？

この疑問に対して、確実に彗星から小惑星へと遷移

したと考えられる決定的な研究成果が発表された。渡部らの研究から、小惑星2003WY25をブランペイン彗星の残骸とみなすことにより、これまで謎とされていた1956年におけるほうおう座流星群の大出現を再現できたのである[5]。また、大塚勝仁氏は、小惑星2005UDの軌道が小惑星(3200)フェートンと似ており、これらがもともとひとつの彗星であった可能性を強く示唆している[6]。他にも、ハワイ大学のHsieh博士らは、小惑星帯内の族と呼ばれるメンバーの中に彗星の振る舞いをする天体を発見している[7]。これらの研究成果から、彗星のなかには分裂し消失するものだけではなく、分裂した破片がそれぞれ枯渇していく場合もあるといえる。枯渇彗星は存在するようだ。

2.3 ダストトレイル理論:流星群の出現予測

1998-2001年のしし座流星群により、ダストトレイル理論が確立・検証されていた[8]。彗星の軌道から、流星群の出現予測が可能となったのである(e.g.[9])。

流星群は、彗星から放出された塵によるものがほとんどである。彗星の回帰にともない、太陽に熱せられ、氷物質が昇華して塵が放出される。回帰ごとに放出された塵の集団は、それぞれが別々のトレイルとして彗星の軌道上に分布し、摂動を受けて軌道進化するのである。回帰ごとの彗星の軌道で塵を放出させてみて、それぞれの塵の空間分布を考えると、微妙に異なる経路のトレイルが何本もできる。流星群はトレイルの集合体であり、ひとつひとつは母彗星の回帰年に対応するのである。このトレイルを計算し、地球との交差状況を見ることで、出現の状況は分単位で予測可能となる。

また、小規模な流星群についても、母天体が確定しているものは出現予測が可能となった。Vaubailion博士らの計算により、6月のうしかい座流星群(ボン・ウィンネッケ流星群)の出現が予測された。彼らの予測に基づき、筆者はこの流星群の観測を实践した。そして、世界で初めての分光データの取得に成功したのである[10]。

3. 流星塵－彗星塵，小惑星塵の熱的進化

3.1 流星体金属組成比の熱変成

ダストトレイル理論により，流星群の出現時期・地域が予測され，多くの流星データを得ることが可能となった．さらに，流星群の分光観測から流星体の金属組成比が得られるようになった．その結果，彗星や小惑星など，流星群母天体の金属組成比も推定可能となった．

ところが，流星群観測から得られる情報には問題点があった．流星体は，ダストトレイルとして宇宙空間を漂っている間，変成・変質の可能性があるからである．つまり，流星群の分光観測から得られた金属組成比は，母天体から放出された後，熱的進化により揮発性成分が昇華し，もともとの組成比が変化しているかもしれないのだ．

彗星から放出された塵は，太陽からの熱的進化を受けている可能性がある．組成比の熱的变化を推定することは非常に困難であったため，未解決のままにされていた．しかし，次の出現条件を満たす複数の流星群を比較することで，解決できる可能性がある点に新しく着目した．

1. 同一彗星起源であり，出現日時によって塵が放出された時間の違いが明確に分かる流星群

2. 近日点距離 (q) が異なる流星群

1.は太陽に晒されていた時間差から，組成比の変化を調べることができる．調査に適していた流星群は，

表1：金属組成比の比較．しし座流星群(1767年トレイル起源と1866年トレイル起源)，ハレー彗星探査結果，太陽組成比，ふたご座流星群．

	しし座流星群 1767年トレイル	しし座流星群 1866年トレイル	太陽組成比 [12]	ハレー彗星 [18]	ふたご座流星群 [13]
Fe/Mg	0.46 ± 0.23	0.50 ± 0.45	0.84	0.52 ± 0.09	0.43 ± 0.07
Ca/Mg*	0.014 ± 0.007	0.011 ± 0.009	0.057	0.063 ± 0.019	0.0031 ± 0.0005
Na/Mg	0.039 ± 0.012	0.031 ± 0.005	0.054	0.10 ± 0.06	0.0036 ± 0.0005

*Caは難揮発性物質であるため，不完全蒸発の可能性が示唆されている (e.g.[1])．

2002年しし座流星群 ($q \sim 0.98\text{AU}$) である．2.は太陽からの距離と組成比の相関を調べることが可能である．しし座流星群とふたご座流星群 ($q \sim 0.14\text{AU}$) に注目した．

3.2 観測

大規模な活動が予想された2002年のしし座流星群と，ふたご座流星群について下記のように分光観測を行った．

3.2.1 2002年しし座流星群観測・NASA国際航空機観測ミッション(Leonid MAC)

2002年のしし座流星群はヨーロッパから北アメリカにかけて長時間にわたって大出現した．例年とは異なり，2種類のダストトレイルから引き起こされると予測されていた．両者の塵が彗星から放出された時間は1866年及び1767年，その差は約100年間となり，太陽熱による組成比の変化を調べる最大の好機であった．アメリカ航空宇宙局 (NASA) も，最後となるしし座流星群大出現のチャンスとして着目していた．スペインからアメリカにかけての，国際航空機しし座流星群観測ミッション・Leonid MACを打ち出したのだ．著者は中心メンバーとして，このミッションに主体的に参加し，航空機からの流星観測を行った．2種類の流星体における金属組成比を導出した結果，両者には明確な違いが見られなかった．近日点距離が0.98AUである流星体のFe:Mg:Na:Caの比は，約100年間では変成しないことが解明された[11] (表1)．

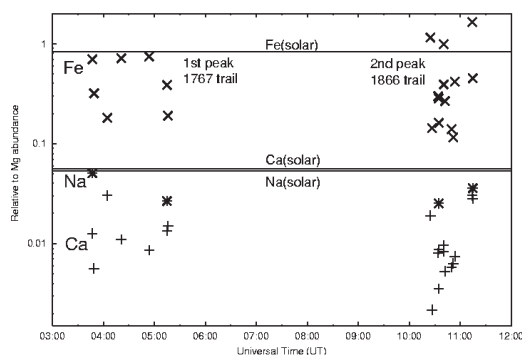


図2：2002 Leonid MAC で得られたしし座流星群（20個）の金属元素組成比（Fe/Mg（×），Ca/Mg（+），Na/Mg（*））。1767年トレイル起源の流星は7個，1866年起源は13個。横線はそれぞれの元素の太陽組成比を表す。[12]。

3.2.2 2004年ふたご座流星群観測

一方，ふたご座流星群の軌道は，しし座流星群とは異なり太陽に非常に近づくため，太陽熱による変成・風化を受けやすいと予想された。そこで筆者は，2004年12月にふたご座流星群の分光観測を行った[13]。その結果，分光データの取得に成功し，金属組成比を導出できた。しし座流星群の分光データとの比較が可能となったのである。ふたご座流星群からは，しし座流星群と同様な金属が同定され，それらの組成比は双方の流星群においてはほぼ等しいことが分かった。ところが，最も揮発性の高い成分であるナトリウムだけが，しし座流星群のそれよりも大幅に欠乏している可能性

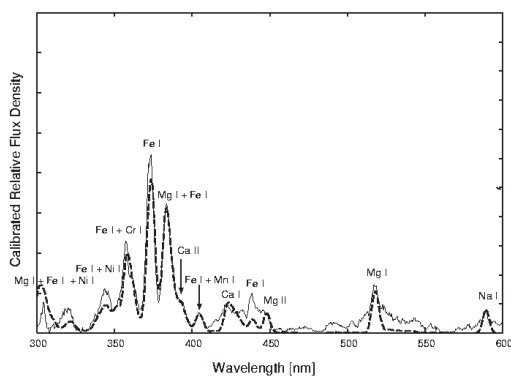


図3：ふたご座流星群の流星スペクトル（2004年12月14日UT）。破線は原子モデルスペクトル，励起温度は $4640 \pm 1.5\text{K}$ 。

が示唆された（表1）。このことは，中性原子輝線強度比のみに着目した統計的観測からも報告されている（e.g.[14]）。

3.2.1, 3.2.2の観測結果より，しし座流星群（ $q \sim 0.98\text{AU}$ ）では，約100年間での太陽熱による組成比の変化はないことが分かった。一方，ふたご座流星群（ $q \sim 0.14\text{AU}$ ）では，揮発性成分であるナトリウムが欠乏している可能性が高いことが分かった[15]。

この結果を受けて，さらに理論的に，熱的影響によるナトリウム枯渇の可能性を調べてみた。流星群の近日点距離とNa存在度，そして流星体温度の相関関係に迫ったのである。

3.3 流星体温度の近日点距離依存性

ナトリウムは，流星体に多く含まれ，比較的揮発性に富んだ金属元素である。そのため，流星体のナトリウム存在度は，ダストトレイルでの熱的進化を調べる上での良い指標となる。

流星群におけるナトリウム存在度の近日点距離依存性を調べるため，これまでの観測結果をコンパイルし

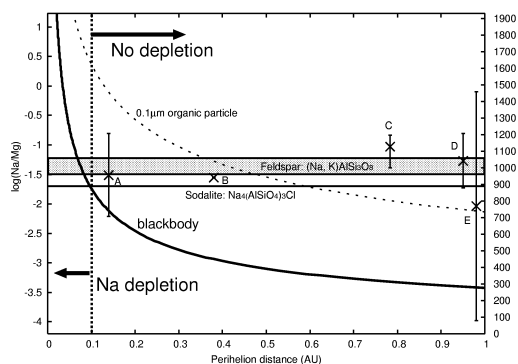


図4：流星群近日点距離と流星体温度の相関図。流星群の観測結果（Na/Mgの平均値）もプロットしている。ストライプ領域はNa/Mgの太陽組成比（左軸）と，アルカリシリケートの昇華温度を示す（右軸）。観測データはA: ふたご座流星群（ $q \sim 0.14\text{AU}$ ），B: おうし座流星群（ 0.38AU ），C: アンドロメダ流星群（ 0.78AU ），D: ペルセウス座流星群（ 0.95AU ），E: しし座流星群，はくちょう座流星群，ジャコビニ流星群（ 0.98AU ）を表す。

た (e.g.[16]). さらに, 流星体温度とアルカリシリケートの昇華温度を考慮し, 流星体の熱的進化について調査した (図4). 流星体温度の上限値は, 有機物で覆われた $0.1\mu\text{m}$ 粒子のfluffyなアグリゲイト温度(破線)[17], 下限値は黒体温度(実線)である. 上限値のダストは, Halley探査から推測されているGreenbergモデルを仮定した[18]. アルカリシリケートの昇華温度は, sodalite ($\text{Na}_4(\text{AlSi}_3\text{O}_8)_3\text{Cl}$) と feldspar ($(\text{Na,K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$) を考えた. Halley探査から, 彗星ダストにおけるNaとClの強い相関が示されているため, 流星体Naの昇華温度を考慮する上ではsodaliteが重要である[18]¹.

図4のA, B, C, D, Eは, 過去の流星群観測結果から得られた近日点距離ごとの平切値を示す. $q \geq 0.14\text{AU}$ である流星群のNa/Mgが, 太陽組成比であることが分かる. $q \geq 0.1\text{AU}$ において, 黒体温度がsodaliteの昇華温度に達していないことに着目すれば, 流星体温度は黒体温度に近いと考えられる. 一方, $q \geq 0.5\text{AU}$ においては, 流星体温度が上限値だと仮定しても, sodaliteの昇華温度に達しないことが明らかである. 本結果は, しし座流星群($q \sim 0.98\text{AU}$)の組成比が, 約100年間にわたり変成しなかった観測結果とも一致する (Sec.3.2.1).

次に, 流星体の物理的性質に制限を加えた. $q \sim 0.14\text{AU}$ において, sodaliteの昇華温度は黒体温度より約20%高い. つまり, 図4から流星体温度と黒体温度の比は1.0-1.2であることが分かる. ダストトレイルの観測から, スーパーヒート (色温度と黒体温度の比) の値は1.0-1.3であり, 我々の流星体温度への制限とはほぼ一致している². さらに, 太陽輻射圧と太陽重力の比 (β) から流星体のサイズ比較的大きいサイズ (mm-cm) であり, 比較コンパクトな構造であることも明らかにされている ($\beta = 10^{-5} \sim 10^{-3}$) [19,20]. つまり, 流星体の温度と構造は, 黒体のようなグレインで特徴づけられる.

図4から, $q \leq 0.1\text{AU}$ の流星体温度は, アルカリシリケートの昇華温度を上回っていることが分かる. つまり, その近日点距離において, 流星体に含まれるNaは失われる傾向にあるのだ. 我々の結論は, 観測と矛盾しないことが確認されている. $q \sim 0.07\text{AU}$ である δ -みずがめ座流星群からはNaの輝線が検出されなかった報告がある. さらに, $q \sim 0.03\text{AU}$ の散在流星群からはNaだけでなくMgやFeの輝線も検出されなかった[14].

流星体温度は, 黒体温度に近いことが分かった. その結果, $q \leq 0.1\text{AU}$ の流星群では, ナトリウムが消失している観測事実を証明できた. だが一方で, ふたご座流星群 ($q \sim 0.14\text{AU}$) のナトリウム枯渇はまだ解明されていない. 少数の組成比結果, あるいは輝線強度比のみからの傾向とはいへ, 複数の研究者から報告されている (Sec.3.2.2). 流星体温度が黒体温度に近ければ, ダストトレイルとして惑星間空間を漂っている期間は, 熱変成を受けにくいはずである. だとすれば, 熱変成を受けたのは, 流星体が母天体から放出される以前の状態だということになる. 今後, その熱的進化に迫るには, 次の2点が重要である.

1. ふたご座流星群の組成比を導出できるデータを数多く得ること

2. 小惑星 (3200) フェートンの探査

4. 枯渇彗星探査と人工流星群

小惑星 (3200) フェートンの素性はまだ解明されてはいない. 観測から, 彗星に見られるコマ活動や尾は確認されていない. その表面は岩石質であり, 比較的始原的なBタイプの小惑星だと知られている. 近

1. 本研究では熱的変成に着目しているため, 水質変成から生成される層状ケイ酸塩は考慮しない.

2. 色温度は, 物体の可視域での放射が黒体放射だと仮定して, その放射の色から推定される温度. 物理温度と必ずしも一致するわけではない.

日点距離は0.14AUと小さく，彗星のように非常に高い軌道傾斜角（22°）が特徴的である．軌道長半径は1.27AU，離心率は0.89である．軌道周期はわずか1.4yrほどであり，短周期彗星の中でもっとも短い周期を持つ2Pエンケ彗星（2P/Encke）の半分ほどの周期である．そのため，何度も太陽に晒されて，氷のような揮発性成分を蒸発し尽くしてしまった彗星の残骸ではないか，とも考えられる．小惑星（3200）フェートンのような枯渇彗星候補天体の探査から，太陽系原始天体の熱的進化・風化過程の新たな知見が大いに期待できる．

我々は小惑星（3200）フェートンへの衝突実験探査を構想中である[21]．地球に，人類史上初の人工流星群を降らせる壮大な計画である．2005年7月4日，NASAが9P/Tmpell彗星に対して衝突実験探査（ディープインパクト）を行った[22]．その結果，人工的に彗星の活動を高め，内部から大量の塵を放出させることに成功した．この様子は，探査機のカメラや地球上の大型望遠鏡からも観測された．すばるでも，東京大学の杉田精司博士らにより中間赤外検出器（COMICS）を用いて衝突放出物の撮像と分光観測が行われた．観測からは，シリケートダストのサイズ分布と結晶化率を知ることができた．その結果，短周期彗星内部のダストは表層のダストとは大きく異なり，長周期彗星のダストに類似していることを新しく発見できた[23]．今回の観測から，短周期彗星特有の表面変成により，長周期彗星とは見掛けが異なっていることが強く示唆された．

このような探査を，流星群の母天体である小惑星（3200）フェートンに行ってみたらどうだろうか．きっと大量の塵が放出され，長い年月をかけてダストトレイルを形成し，やがては地球に入工の流星群がやってくるだろう．その流星群は，小惑星（3200）フェートンの内部から放出された塵から引き起こされる．そのような塵は，9P/Tmpell彗星でもそうであったように，変成を受けていない可能性が高い．枯渇彗星本体の表面探査とその内部から放出された塵による流星

表 2：小惑星（3200）フェートンの黄道面通過日（2017 年～ 2030 年）

2017 年 /12 月 /23 日	2025 年 /2 月 /22 日
2019 年 /5 月 /31 日	2026 年 /7 月 /31 日
2020 年 /11 月 /5 日	2028 年 /1 月 /5 日
2022 年 /4 月 /12 日	2029 年 /6 月 /12 日
2023 年 /9 月 /18 日	

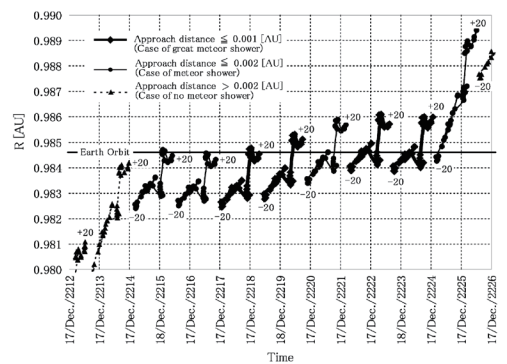


図 5：ダストトレイル分布の計算結果．2022 年 4 月 12 日にインパクトを加えた場合．流星群は，2215 年から 2225 年までの 10 年続く（トレイルと地球公転軌道の距離 ≤0.002AU）．2218，2219，2222，2223 年には流星嵐となる（≤0.001AU）．

群の観測から，流星－彗星，小惑星の熱的進化，さらには風化過程に鋭く追えることができるのだ．

では，いつ流星群が見れるのだろうか？ 先に述べたダストトレイル理論から，流星群の出現時期を予測した [24]．衝突実験（インパクト）を行う時期は，小惑星（3200）フェートンの黄道面通過日を仮定した（表2）．

本研究では，2022年4月12日にインパクトを与えた場合について，ダストトレイルの分布を計算した（図5）．その結果，インパクトから約200年後に，地球で流星嵐が起こることが分かった．本探査にて，ふたご座流星群の組成比を導出できる良質の観測データを数多く得ることと同時に，母天体である小惑星（3200）フェートンの起源と進化に迫る研究が可能である．

5. 流星科学から始原天体探査へ

流星群分光観測により、流星塵－彗星塵、小惑星塵の金属組成比を得て、流星体の熱的進化を明らかにしてきた。今後解決すべき点は、あらゆるサイズの始原天体（物質）における熱的進化・風化過程、そしてその最終形態についての知見である。始原天体の最終進化とその過程には未知な点が多い。流星体（mm-cmサイズ）に加え、小天体（kmサイズ）における熱的進化・風化過程に制限を与えることが重要である。そのためには、流星群と関連した枯渇彗星の探査は必須である。

今回、例として紹介した探査には、3つの挑戦がある。ひとつは、始原天体の熱的進化・風化研究の躍進（サイエンス）、ふたつめは、探査機により流星群をおこす技術力（エンジニアリング）である。そして3つめは、流星群により「未来に夢を托す」という社会的アピールへの新たな挑戦である。

流星科学により、始原天体科学は新たな一步を踏み出せた。今後、枯渇彗星を探査できる機会があれば、本研究で得られた知見を十分に生かすことができるであろう。その際には、日本が独自に開発した工学試験衛星:MUSES-C（はやぶさ）で確立された技術力とコラボレーションできれば幸いである。

謝辞

本稿に関して、渡部潤一氏、佐藤幹哉氏、そして査読者である河北秀世氏から有意義なコメントをいただきました。深く感謝いたします。また、本研究を紹介する機会を与えてくださった倉本圭氏、田中秀和氏にお礼申し上げます。

筆者は日本学術振興会の援助を受けています。

参考文献

- [1] Cepelcha, Z., et al., 1998, SpaceSci. Rev. 84, 3/4, 327
- [2] Kasuga, T., et al., 2005a, A & A 435, 341
- [3] Kasuga, T., et al., 2006b, AdSpR in press
- [4] Jewitt, D., 2005, Comet II (Univ. Az. Press) 659
- [5] Watanabe, J. et al., 2006, PASJ 57, 5, L45
- [6] Ohtsuka, K., et al., 2006, A & A 450, 3, L25
- [7] Hsieh, H. H. & Jewitt, D., 2006, Science 312, 5773, 561
- [8] Jenniskens, P. & Butow, S. J., 1999, Meteoritics & Planet. Sci. 34, 933
- [9] McNaught, R. H. & Asher, D. J., 1999, Meteoritics & Planet. Sci. 34, 975
- [10] Kasuga, T., et al., 2004, A & A 424, L35
- [11] Kasuga, T., et al., 2006a, ApJ 638, 1176
- [12] Anders, E., & Grevesse, N, 1989, Geochim. Cosmochim. Acta 53, 197
- [13] Kasuga, T., et al, 2005b, A & A 438, L17
- [14] Borovička, J., et al., 2005, Icarus 174, 1, 15
- [15] Kasuga, T., 2006e, Ph. D Thesis
- [16] Kasuga, T., et al., 2006c, A & A, 453, L17
- [17] Li, A. and Greenberg, J. M., 1997, A & A 323, 566
- [18] Jessberger, E. K., et al., 1988, Nature 332, 691
- [19] Ishiguro, M., et al., 2002, ApJ 572, L17
- [20] Kimura, H. et al., 2002, Icarus 157, 349
- [21] Kasuga, T., et al, 2006d, MNRAS in press
- [22] A'Hearn, M. F., et al., 2005, Science 310, 5746, 258
- [23] Sugita, S., et al., 2005, Science 310, 5746, 274
- [24] Sato, M., 2003, WGN 31, 2