

分裂彗星 C/2001 A2 (LINEAR) の低分散分光観測

古 荘 玲 子

〈早稲田大学教育・総合科学学術院 〒169-8050 東京都新宿区西早稲田 1-6-1〉

e-mail: furshork@cc.nao.ac.jp

河 北 秀 世

〈京都産業大学 〒603-8555 京都市北区上賀茂本山〉

e-mail: kawakthd@cc.nao.ac.jp

藤 井 貢

〈藤井-美星観測所 〒713-8126 岡山県倉敷市玉島黒崎 4500〉

e-mail: aikow@po.harenet.ne.jp

2001年1月に発見された C/2001 A2 (LINEAR) 彗星は、その年の3月末に急に5等ほども明るくなった後、しばしば小規模の増光を繰り返す。増光時には核から小片を放出していた様子も観測された。筆者らはこの彗星について、3月の急増光直後と近日点通過後に低分散分光観測を行い、ガス/塵生成比を求め、CN分子、C₂分子、そしてNH₂分子の水分子に対する生成比を測定した。また、これらの変動についても調査した。

1. 分裂彗星 C/2001 A2 (LINEAR)

2001年1月3日に発見されたリニア彗星 (C/2001 A2 (LINEAR)) は、リンカーン地球近傍小惑星探索プロジェクト、通称 LINEAR プロジェクト^{*1}が発見した数多あるリニア彗星のうちの一つである¹⁾ (以降、簡単のためと他のリニア彗星と区別するために、この彗星を“C/2001 A2”と表記することにする)。発見当時は太陽から2.4天文単位の距離にあって19等で発見された。特段、明るいわけでもなく、特段、変わったところもない、普通の彗星として。しかし、2001年3月末頃から様子が変わる。太陽まで約1.3天文単位まで近づいたこの彗星は急に明るさを増し、3月

30日頃には約1日間で5等以上も明るくなった。

急に明るくなる彗星は、まれではあるがほかにもある。例えば、シュヴァスマン-ヴァハマン第1周期彗星 (29P/Schwassmann-Wachmann 1)^{*2}である。この彗星は太陽から5.7-5.9天文単位のところを回っているが、時折、一時的に数等ほど明るくなり、しばらくすると元の明るさに戻ることが知られている。しかし、C/2001 A2の場合、明るさは数日かけて若干落ちたものの、元の光度変化曲線に戻ることはなく、そのまま明るい彗星として近日点に向かっていった。

一部の彗星 (主に短周期彗星) には、彗星活動の期間が近日点通過日の前後数百日程度で、太陽から近いときと遠いときとは光度変化の様子が

^{*1} <http://www.ll.mit.edu/LINEAR/>

^{*2} 最近の彗星命名ルール改定で、これまで周期彗星名の人名の後につけられていた数字 (日本語表記で言えば“第‘1’周期彗星”などの数) は付記しないことになったが、本稿ではわかりやすさを優先して旧命名ルールに従って表記する。

異なり、彗星活動が見られる期間は急に明るくなるものもある。しかし、C/2001 A2 の場合、急増光するより前、発見当初から彗星活動を見せていた。

3月末の C/2001 A2 の急増光時には、実は核から小片が放出されていたことがわかった。さらにその後、近日点通過を挟んで何度も小規模の増光と核からの小片放出が観測された。

彗星核が複数の核に分かれる現象だけでなく、このように彗星核から小片が放出される現象も含めて彗星核の分裂現象といい、短期間の増光を伴うのが常である^{2),3)}。彗星核の分裂現象はどうして起こるのだろうか。例えば、1994年夏に消滅してしまったシューメーカー–レビー第9周期彗星(D/Shoemaker–Levy 9)は、木星に非常に接近したときに木星の潮汐力で破壊されて数十の核の連なりとなり、その後次々に木星に衝突して消えた。あるいは、池谷–関彗星(C/1965 S1 (Ikeya–Seki))など“クロイツ群”として知られる、太陽をかすめるようにして近づく軌道をもつ彗星の一群は、過去に太陽の潮汐力で破壊された一つの彗星であったと考えられている。これらの彗星核については、分裂の原因は太陽や木星に近づきすぎたために潮汐力で破壊されたものと推定できているが、それ以外の多くの場合、彗星核を分裂させる要因は明らかでない。例えば、1999年に発見されたリニア彗星(C/1999 S4 (LINEAR): C/2001 A2とは別の彗星)は、2000年夏の近日点通過前に彗星核がいくつかの破片に分裂し消滅してしまっただが、なぜこの彗星が分裂したのかはいまだに謎である。

C/2001 A2 は、近日点の通過を挟んで数カ月の間に消滅することもなく何度も分裂を繰り返した。彗星核の分裂現象自体はしばしば起こるものだが、ここまで分裂現象や増光を繰り返す彗星も珍しい⁴⁾。図1は、C/2001 A2 (LINEAR) 彗星の近日点前後の光度変化である。横軸は C/2001 A2 の近日点通過日すなわち 2001年5月24.5日 [UT]

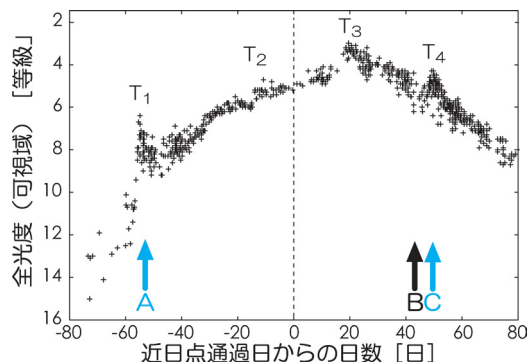


図1 C/2001 A2 (LINEAR) 彗星の光度変化。横軸は C/2001 A2 (LINEAR) 彗星の近日点通過日 (2001年5月24.5日 [UT]) からの日数、縦軸は国際彗星季報 (ICQ: International Comet Quarterly) に報告された彗星の明るさ (等級)。T₁–T₃ でマークした箇所では増光とともに核の分裂現象が見られたが、T₄ では増光のみで分裂は観測されていない。上向き矢印 A–C は筆者らの観測を示す (本文参照)。

からの日数で、近日点通過前は負の値になっている。縦軸は国際彗星季報 (ICQ: International Comet Quarterly) に報告された彗星の明るさ (等級) である。急増光が観測された箇所を T₁–T₄ で示した。このうち、T₁, T₂, および T₃ の増光時には核の分裂現象も同時に観測された。しかし T₄ の増光時にはそれらしい現象は観測されていない。このように分裂と増光を繰り返すこの彗星は、他の彗星とどこが違うのだろう。

筆者らはこの彗星について、近日点通過を挟んで分光観測を行った⁵⁾。最初の分光観測は、2001年3月末の急増光で非常に明るくなった4月1日に行った。図1の上向き矢印 A, B, および C は筆者らの観測実施日を示す (詳細は次章以降)。

2. 分光観測: GCS と FBSPEC-1

筆者らの研究では、二つの望遠鏡/分光器システムで分光観測を行った。一つは、県立ぐんま天文台の 65 cm 望遠鏡に取り付けたぐんま小型分光器 (GCS) である (本特集・衣笠健三氏の記事

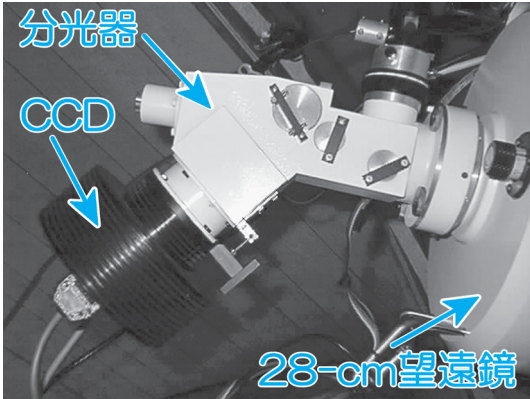


図2 藤井-美星観測所 藤井低分散分光器. (FBSPEC-1)

表1 GCSとFBSPEC-1の設定対比表.

	GCS	FBSPEC-1
スリット (幅×長)	2秒角×600秒角	7秒角×424秒角
波長 分解能 (@550nm)	R=500	R=450
波長域	380.0-760.0nm	450.0-720.0nm
特記	65-cm (F/12) 望遠鏡 カセグレン焦点装着時	28-cm (F/10) 望遠鏡 カセグレン焦点装着時

の図2を参照). もう一つは, 藤井-美星観測所 28 cm 望遠鏡と藤井低分散分光器 (FBSPEC-1)^{5), 6)}である(図2). FBSPEC-1は1996年8月から2003年4月まで稼働した(現在は後継機のFBSPEC-2が稼働中). この間の観測により, 現在までに彗星のほか惑星や新星, 変光星などの分野での論文が11本出ており, 国際天文学連合回報 (IAU Circular) への観測報告はさらに多数ある.

表1に二つの分光器の今回の観測でのセッティングをまとめた.

観測は, 最初の急増光が観測された直後である4月1日に, ぐんま天文台 65 cm 望遠鏡とGCSを用いて行った(図1の矢印A). その後, 藤井-美星観測所 FBSPEC-1を用いて近日点通過後の7月2日(図1矢印B), およびぐんま天文台 65 cm

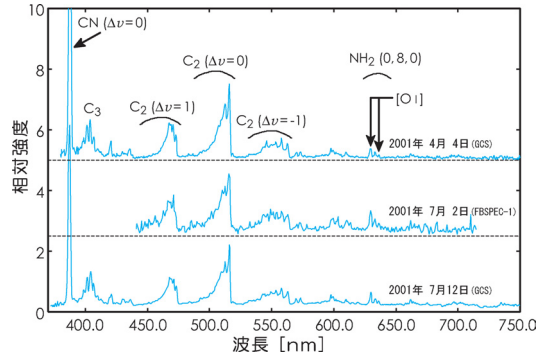


図3 観測されたスペクトル.

上から順に, 2001年4月1日(ぐんま 65 cm + GCS), 同年7月2日(藤井-美星観測所 28 cm + FBSPEC-1), 同年7月12日(ぐんま 65 cm + GCS)の観測. 4月1日と7月2日のスペクトルは, 同時に表示するために縦軸方向にシフトしてあり, それぞれのゼロ点は破線で示している. いくつかの目立った輝線については分子名などを表示した.

望遠鏡とGCSで7月12日(図1矢印C)にも観測を行った. 矢印Bの観測は, 増光や分裂といった現象は観測されていない時期に行われたが, 矢印Cの観測はちょうどT₄の増光時と重なっている.

それぞれ観測されたスペクトルを図3に示す. 横軸は波長で縦軸は相対強度である. 同時に表示するために, 4月1日および7月2日のスペクトルは相対強度のゼロ点をずらしてあり, 破線がそれぞれの日のスペクトルのゼロ点である. なお, スペクトルは波長 625.0 nm の連続光成分のところで正規化してある.

可視域の彗星スペクトルは, 塵による太陽散乱光と, ガス分子などによる蛍光散乱の輝線などからなる. スペクトルで, ゼロ点からかさ上げされている“ゲタ”の部分が, 塵による太陽散乱光の成分である. C/2001 A2のスペクトルでは, ガス分子の輝線の強度に比べて“ゲタ”の分がほとんどないことから, 大まかに言ってガスが多い彗星であることが見て取れる.

図3の各スペクトルには, C₂分子やNH₂分子

などの出す輝線, 酸素の禁制線 ([O I]) といった彗星に特徴的な輝線が見られる。GCS で撮られたスペクトルには CN 分子が出す輝線が見られるが, FBSPEC-1 のスペクトルには残念ながら観測可能な波長範囲が若干狭いために写っていない。

3. 観測結果から何がわかったか

観測されたスペクトルから, CN, C₂, HN₂, および [O I] の輝線フラックスを測定した。また, 塵の量を推定するために, 625.0 nm の連続光成分 (塵による散乱光成分) の強度を測定した。

測定した輝線フラックスを基にそれぞれの分子の生成率を推定するには Haser モデル⁷⁾を用いた。CN にしても C₂ や NH₂ にしても, いずれも彗星核から直接放出された分子ではなく, 別の分子が太陽紫外線によって光乖離したラジカルと呼ばれる分子である。光乖離で CN などを生成した元の分子を親分子, 親分子から光乖離して生成された CN などを娘分子, さらに CN などが壊れてできた分子を孫分子と呼ぶ。Haser モデルは, 彗星核から放出された親分子がある寿命で娘分子になり, さらに娘分子もある寿命で光乖離して消滅すると考えるモデルである (図4)。Haser モデルでは, CN や C₂ などの娘分子は 1 種類の親分子から生成され, また, 親分子から生成される娘分子も 1 種類であると仮定している。さらに, 分子の運動は彗星核からの動径方向に一定速度であり, 光乖離過程によって運動方向は変化しないものとしている。この Haser モデルは単純化されたモデルではあるが, 単純化されているがゆえに他のモデルへの変換が容易であり, よく用いられているため他の研究結果との比較もしやすい。

Haser モデルで観測からガス分子の量を導くためには, どのくらい分子が広がっているかを示すスケール長 (拡散速度×寿命) と, その分子が単位時間当たりどのくらい光子を出せるかを示す g ファクター (蛍光効率) と呼ばれるパラメーター

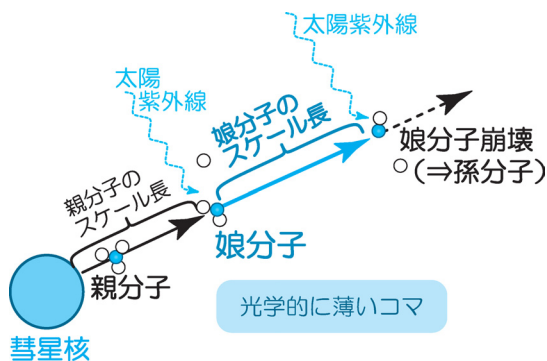


図4 彗星コマのモデル。

Haser モデルに基づき, 観測された分子による蛍光発光の輝度からコマ中の分子の量を推定するモデル。

が必要である。これらは, CN および C₂ については Fink & Hicks⁸⁾ の値を, NH₂ については Huebner ら⁹⁾ および Kawakita & Watanabe¹⁰⁾ の値を用いた。分子の発光輝度から生成率を算出する際には, 光学的に薄い彗星コマを仮定した。分子 X について求めた生成率を $Q(X)$ (例えば, CN の生成率は $Q(\text{CN})$) と表記する。

一方, 塵については, $Af\rho$ と呼ばれる量を塵の生成量の指標として用いる。ここで, A は塵のアルベド, f は天球面上で彗星核からの距離 ρ の視野内における単位面積当たりの塵の総断面積である。この量は観測される彗星コマのフラックスから直接求めることができる¹¹⁾。この $Af\rho$ を使って, ガス/塵生成比を示す値として, $\log_{10}[Q(\text{H}_2\text{O})/Af\rho]$ という値を求めた。 $Q(\text{H}_2\text{O})$ は, 630.0 nm の酸素禁制線 [O I] から求めた水 (H₂O) の生成率である。630.0 nm の [O I] は準安定状態酸素 O(¹D) から生じる。O(¹D) を生成する反応は, 水が壊れて O 原子と H₂ 分子に崩壊する過程のほか, 水分子から壊れてできた OH 分子の崩壊で生成される過程, さらに CO 分子や CO₂ 分子が崩壊する過程が考えられる。しかし, 彗星が太陽から 1 天文単位程度に近づいているときは, 彗星コマ中のガス分子の 8 割が水であり, CO 分子や CO₂ 分子より圧倒的に水分子のほうが多い。ここでは

表2 観測された分子生成率比とガス/塵生成比の比較, および, 分子生成率比の過去の研究との比較.

	2001年 4月1日	2001年 7月2日	2001年 7月12日	C/2001 A2 (平均値)*		Finkら (1999) Halley クラス
				モデル A	モデル B	
$Q(\text{CN})/Q(\text{H}_2\text{O})$ [%]	0.28 ± 0.04	—	0.22 ± 0.01	0.25 ± 0.02	0.30 ± 0.03	0.09–0.32 (平均 0.16)
$Q(\text{C}_2)/Q(\text{H}_2\text{O})$ [%]	0.43 ± 0.06	0.35 ± 0.09	0.43 ± 0.01	0.40 ± 0.04	0.48 ± 0.04	0.16–0.39 (平均 0.27)
$Q(\text{NH}_2)/Q(\text{H}_2\text{O})$ [%]	0.32 ± 0.04	0.49 ± 0.15	0.42 ± 0.01	0.36 ± 0.05	0.43 ± 0.05	0.13–0.44 (平均 0.27) [†]
$\log_{10}[Q(\text{H}_2\text{O})/Af\rho]$	26.7 ± 0.08	26.6 ± 0.11	26.4 ± 0.01			

* モデル A は $\text{O}(^1\text{D})$ の供給源として H_2O 分子の崩壊と H_2O 崩壊物である OH 分子の崩壊との双方を考慮して H_2O 分子生成率を計算した. 一方, モデル B は Fink らの研究と比較するため, H_2O 分子の崩壊のみを考慮 (本文参照).

[†] $Q(\text{NH}_2)$ については, Kawakita & Watanabe (2002) により改定された g ファクターを用いて再計算した (本文参照).

ひとまず, $\text{O}(^1\text{D})$ 原子はすべて水分子の崩壊から生成されると仮定して, 水分子の生成量を推定した. ただし, 水分子崩壊過程のうち, O 原子と H_2 分子への崩壊過程で生じる $\text{O}(^1\text{D})$ のみではなく, さらに水分子の崩壊物である OH 分子の崩壊による $\text{O}(^1\text{D})$ の寄与も考慮した.

求められたそれぞれの分子の水分子に対する生成率比とガス/塵生成比を表2にまとめた. また, 各観測の平均値と, 過去に同様の観測を行ってきた Fink らの研究¹²⁾との比較を行った. Fink らはこれまで40個の彗星についての結果についてまとめ, クラス分類をしている. 表2には, Fink らが Halley クラスと分類した彗星の, 各ガス分子の水分子に対する生成率比を載せてある. ただし, NH_2 の生成率については, Fink らの結果は古い g ファクターに基づいているので, Kawakita & Watanabe¹⁰⁾ が改定した g ファクターで再計算したものを掲載した. さらに, 筆者らの観測結果の平均値に関しては, $\text{O}(^1\text{D})$ の供給源として OH 分子の崩壊の寄与も考慮したモデル (モデル A) に加え, Fink ら (1999) の結果と比較するために O 原子と H_2 分子への崩壊過程のみを考えたモデル B の双方を載せた.

さて, C/2001 A2 の彗星核分裂現象や増光で, 分光観測の結果には顕著な変動はあったのだろうか. あるいは, 他の彗星と比べて特異なところはあるだろうか. 表2を見る限り, ガスの組成比も

ガス/塵生成比も, 各観測日ごとの顕著な変動は見受けられない. ガス/塵生成比についてはファクターで2程度の変動があるが, これは彗星核中のガスと塵の混合具合の不均質性か, あるいは核分裂時に彗星核内部から放出された塵のサイズ分布が静穏時と異なっている可能性を示唆している. 類似の例として, 1996年秋に拡散して消滅してしまっただけの彗星 (C/1996 Q1 (Tabur)) は, 拡散していくとともにガス/塵生成比が変化していた⁶⁾. ちなみに, この彗星はその軌道要素の酷似性から1988年に発見されたリラー彗星 (C/1988 A1 (Liller)) との分裂核ペアであると考えられている.

一方, ガスの組成比についてはどうだろうか. C/2001 A2 が他の彗星とどこが異なっているか? という視点で, この彗星の平均的な化学組成を検討しよう. C/2001 A2 の分光結果を Fink らの分類と比較すると, いわゆる Halley クラスに近いことがわかった. しかし, よく眺めて見ると, C_2 の量が (水分子に対する比として) 多めであることに気づく. 実際, 最近の報告では, C_2 の親分子と考えられている C_2H_2 分子が (ガス組成比として) 他の彗星に比べて約2倍多い¹³⁾という特異性を見せている. これは, 筆者らの結果と矛盾しない. また, 彗星に含まれる分子の形成温度を示すと考えられる核スピン温度についても, 水やアンモニアの観測では他の彗星に比べて低い値

を示している^{13), 14)}. C_2H_2 分子の揮発性が極めて高いことを考え合わせれば, C/2001 A2 は他の彗星に比べて揮発性の高い物質に富んでいたと考えられる. そして, 彗星が太陽に近づき温められてこのような揮発性の高い物質の急激な昇華が起き, 分裂や増光の原動力になったのではなかろうか.

謝 辞

図1を作図するに当たり, データコレクションを提供していただいた吉田誠一氏に深く感謝する. 吉田氏は, 光度観測の報告データをまとめ整理し, 光度変化を各彗星についてグラフ化し, 彗星のプロフィールなどとともに Web サイト (<http://www.aerith.net/index-j.html>) で随時公表している. 氏の事業の成果は, 国内の我々のもとより, 国外の彗星研究者にとっても観測・研究の一助となっている.

また, 日々(夜ごと), 彗星の位置精測や光度観測を行っている観測者たち, 位置推算を行う計算者の存在があってこそ, 我々の観測があることはいうまでもない.

参考文献

- 1) Pravec P., Sarounova L., Tichy M., Kocer M., 2001, IAU Circ. 7564
- 2) Sekanina Z., 1982, in Comets, ed. L. L. Wilkening (Tucson, AZ: University of Arizona Press), p. 251
- 3) Sekanina Z., 2002, ApJ 566, 577
- 4) Sekanina Z., et al., 2002, ApJ 572, 679
- 5) Furusho R., et al., 2003, PASJ 55, 1153
- 6) Kawakita H., Furusho R., Fujii M., Watanabe J., 1997, PASJ 49, L41
- 7) Krishna Swamy K. S., 1997, in Physics of comets, 2nd ed. (Singapore: World Scientific), p. 131

- 8) Fink U., Hicks M. D., 1996, ApJ 459, 729
- 9) Huebner W. F., Keady J. J., Lyon S. P., 1992, Ap&SS 195, 7
- 10) Kawakita H., Watanabe J., 2002, ApJ 572, L177
- 11) A'Hearn M., et al., 1984, AJ 89, 579
- 12) Fink U., Hicks M. P., Fevig R. A., 1999, Icarus 141, 331
- 13) Dello Russo N., et al., 2005, ApJ 621, 537
- 14) Kawakita H., et al., 2004, ApJ 601, 1152

Low-Dispersion Spectroscopy on Split Comet C/2001 A2 (LINEAR)

Reiko FURUSHO

School of Education, Waseda University, 1-6-1 Nishi-Waseda, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8050, Japan

Hideyo KAWAKITA

Department of Physics, Faculty of Science, Kyoto Sangyo University, Motoyama, Kamigamo, Kita-ku, Kyoto 603-8555, Japan

Mitsugu FUJII

Fujii-Bisei Observatory, 4500 Kurosaki, Tama-shima, Okayama 713-8126, Japan

Abstract: Visual magnitude of comet C/2001 A2 (LINEAR), which was discovered on January, 2001, increased by more than 5 mag. at the end of March, 2001. After that, several splitting and/or flare-up events of the comet were observed within four months around its perihelion passage. We have carried out low-dispersion spectroscopic observations of the comet. The dust-to-gas ratio was determined, as well as gas production rate ratio of CN, C_2 , and NH_2 relative to H_2O . In addition, the gas production rate ratios of each observation result were compared.