

流星の短痕を測る

—イメージインテンシファイア付ビデオカメラの 2点観測成果から迫る短痕の発達・減衰過程—

戸田 雅之* 山本 真行** 重野 好彦***

(受領日:2010年4月28日、受理日:2010年6月13日)

* 日本流星研究会 流星痕同時観測(METRO)チーム

〒168-0063 東京都杉並区和泉1-16-13

E-mail: *metrotokyo_masa_toda@yahoo.co.jp

** 高知工科大学 システム工学群

〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口185

E-mail: **yamamoto.masa-yuki@kochi-tech.ac.jp

*** 流星物理セミナー

〒211-0021 神奈川県川崎市中原区木月住吉町5-6

要約: 流星出現直後にはごく稀に流星経路をなぞるように細い発光体が見える。それは短時間で減光し、形を変えながら消失する。これを流星痕と呼ぶ。流星痕の発生確率が最も高いのは毎年11月中旬に出現する「しし座流星群」である。我々はしし座流星群の2001年大出現で、イメージインテンシファイアを使用した流星の2点観測を実施した。動体検出ソフトウェアの使用により、動画から発光継続時間が短い流星痕(以下、短痕)を効率よく抽出できた。本研究では、しし座流星群に属する流星起源の短痕18例、しし群以外の流星起源の短痕8例、計26例の短痕を測定して発光高度と継続時間を求めた。その結果、(1)短痕は平均的に120 kmから96 kmの範囲で発光する。(2)短痕発生後、上端側は時間経過とともにその高度を直線的に徐々に低下させる一方で、下端側は母流星突入に伴い低高度側へ一気に成長し短痕長の最大を迎えた後、対数関数の漸近曲線的に上昇し、短痕消失直前には平均高度107 kmに収れんする。(3)短痕の継続時間は短いもので0.1秒、最長で5秒。(4)母流星絶対等級と短痕の継続時間に有意な相関がある。(5)短痕の継続時間はOI557.7 nm(励起状態特性寿命0.7秒)発光を仮定すれば説明できる可能性が高い、ことが分かった。

1. はじめに

流星発光直後の軌跡に、一般に1秒程度、時には1分、大変に稀な例では60分にわたり継続した発光が見られる。それを流星痕と呼ぶ。流星は瞬時の現象であり、いつどの方向に何等級の流星が出現するか予測するのは不可能である。このような流星の撮影は、基本的にはカメラを一定の天域方向に向ける待ち受け観測の手法がとられる。この場合はカメラの視野内に偶然入ってきた流星のみが解析対象となる。

流星痕はその発光時間長で短痕と永続流星痕に分けられる。継続時間が長いものを永続流星痕と

呼ぶ。永続流星痕の発生確率は非常に低いが、観測の歴史は決して新しくない。永続流星痕のうち発光時間が非常に長いものは流星本体消失後でも十分に目撃可能であり、科学研究がなされる以前より謎の発光物体として市民によるスケッチや目撃記録等が残されている(戸田ら, 2004)⁽¹⁾。

Trowbridge (1907)⁽²⁾以降、眼視観測された流星痕の知見は時々学術論文として出版されてきた。母彗星の回帰にあわせ約33年おきに爆発的な出現を見せてきたしし座流星群と歩調を合わせるように永続流星痕の知見が増加し、観測機材も進化した。1966年の大出現では長沢(1978)⁽³⁾により

写真を用いた観測・研究が残された。2001年の大出現前後では前回出現時には存在しなかった高感度フィルムが活躍し、大勢のアマチュア天文家が流星痕撮影を行なった。一眼レフデジタルカメラ、イメージインテンシファイア（以下II）、冷却CCD等も流星痕観測にはじめて使われた。阿部ら(2005)⁽⁴⁾のしし座流星群の永続流星痕の分光観測論文では、1998年の観測では高感度フィルム、2001年の観測ではIIビデオによる結果が報告されており4年間の観測機材の進歩も反映されている。

2001年の大出現では観測手法でも特筆すべき変化があった。流星痕の良質かつ大量のデータ取得を目的に、戸田と山本は、流星痕同時観測キャンペーンを提唱した。日本のアマチュア天文家を主とする観測者の献身的な協力により2001年11月18日UTの極大夜の数時間で、国内各地で行われた写真撮影から永続流星痕40例以上の同時観測と100例以上の単独観測による人類観測史上最大の流星痕データを取得した(戸田ら, 2003)⁽⁵⁾。

この成果は流星痕画像カタログ論文(戸田ら, 2004, 比嘉ら, 2005)^(1,6)として結実した。そして永続流星痕の3次元構造解析と発光高度(山本ら, 2003)⁽⁷⁾をはじめ、しし座流星群永続流星痕の形状分類や、形態学・統計学的な解析と考察(比嘉ら, 2003)⁽⁸⁾を行い、さらに永続流星痕の観測条件や母流星の絶対光度別の形態分類も試みた(比嘉, 2006)⁽⁹⁾。

永続流星痕に対し、極めて短時間で消失する流星痕を短痕と呼ぶ。両者の発光過程は未だ完全には解明されていないため、本論文では便宜的に継続時間3秒をもって永続流星痕と短痕を区別する。短痕も視認可能であるが、出現後の撮影が著しく困難な対象として長らく解析の対象になり得なかった。2001年しし座流星群の大出現の夜に幸運にも捉えられた流星と同流星起源の短痕の写真撮影例を図1に掲載する。

日本では1980年代はじめに眼視の数万倍の感度を持つIIとビデオカメラ(以下IIビデオ)を用いた流星撮影が始められた。1980年代後半から熱心な流星観測者たちはIIビデオによる定常的流星観測を始めている。観測目的は暗い流星までを含む流星群の軌道計算の統計や回折格子を用いた分光観測、そして出現数のモニター観測である。軌道計算目的で数10km程度離れた2地点から同時撮影された動画像には、ときどき流星出現後の短痕も記録されていた。2001年しし座流星



図1 しし座流星群の流星(左)と直後に出現した短痕(右)。流星は斜め左上から右下へ流れている。短痕は流星の光り始めの領域に残っている。2001年11月18日19時24分19秒UT(世界時)、ニコンF4s, 200 mm F2, シャッタースピード1秒、フィルム:フジ・スベリア1600, 撮影:戸田雅之。

群の極大夜に写真とIIビデオによる2点同時観測を実施した重野ら(2003)⁽¹⁰⁾はわずか数時間に100例以上の同時流星記録を得た。

我々は、流星観測が主目的のIIビデオ2点同時観測が流星出現から短痕の発達と消長までを切れ目無く捉えている点に注目した。これは流星の発光高度のみならず、短痕の発光高度や発達・減衰についても議論可能なことを意味する。軌道計算目的で撮影されたIIビデオによる2点観測動画アーカイブのうち、2001年しし座流星群の動画像に最新の動体検出ソフトウェアを適用し再解析した。極大時刻を含む約2時間の観測結果の再解析から26例の短痕を抽出した。本解析では、全ての母流星と短痕がビデオ観測の時間分解能を有している。2点同時観測が成立した流星は三角測量の応用で軌道計算や高度の算出が可能で、既に重野により流星の出現高度が計算済みであり、短痕の出現高度も詳細に算出可能である。

2. 観測

IIビデオカメラによる観測機器を群馬県赤城山麓(139°11' E, 36°28' N, 529 m)と埼玉県長瀨(139°06' E, 36°05' N, 230 m)の2地点に設置した。観測地間の距離は43.2 kmである。対物レンズの焦点距離と明るさは85 mm, F1.2、視野は10.5度×8.5度。第2世代のIIにより光を約5万倍に増幅し、最微恒星等級は10等級である。

増幅された蛍光面を41万画素CCDカメラで撮

影し、Hi-8 ビデオテープに録画した。観測期間は2001年11月18日17時14分～20時17分 UT(日本時間11月19日2時14分～5時17分)の183分間。撮影された同時流星数150のうち102流星の軌道が求められた。このうち、しし座流星群は35流星。流星経路の平均誤差は90秒角であった(重野、重野ら, 2003)^(10,11)。

この夜の眼視観測でしし座流星雨の極大が求められている。極大時刻は11月18日18時17分 UT(日本時間19日3時17分)で、理想条件下の時間流星数(ZHR)は 3120 ± 100 であった(小川・内山, 2002)⁽¹²⁾。

3. 流星痕の抽出

撮影済の動画像から流星や流星痕などのイベントを見つけ出すのは容易ではない。代表的な方法を2つ挙げる。

- (1) 1人または数人で同じ動画像を見つけて流星を数え、流星痕が視認できたらコマ送りで抽出する。
- (2) 動体検出ソフトウェアを使用して流星や流星痕を抽出する。

最初の方法は手軽に始められる半面、流星や流星痕イベントを目視する人を長時間束縛する必要がある。しかも1回の目視では必ず見逃したイベントが発生する。何度も同じ動画像を見直した結果、1回目の目視よりも必ずイベント数が増える。

(2)の方法では専用のビデオキャプチャーボードを搭載したPCに動体検出ソフトウェアのインストールが必要である。本研究ではシェアウェアの“UFOCapture”(SonotaCo, 2009)⁽¹³⁾を使用した。2004年に誕生したUFOCaptureは流星観測者とソフトウェア開発者の熱心なやり取りの結果バージョンアップが繰り返されている。2010年現在、流星の動画観測分野では標準的に使われているソフトウェアで、流星や流星痕だけでなくレンズ前を横切ったものを設定された一定境界条件の下で自動的に抽出できる。

我々は当初から(2)の方法を採用した。Hi-8ビデオテープに記録されたアナログ映像は、ビデオキャプチャーボードによるA/D変換を介し、動体検出ソフトUFOCaptureのインストール済PCを経由して、標準動画形式AVIファイルに変換される。撮影領域内に何か動いた時刻の前後数秒間の動画のみが自動的に抽出・記録される。このままでは流星だけでなく、移動する雲、鳥や虫の飛来、霧を照らしたクルマのヘッドライト等も

記録される。最終的にはAVIファイルを再生して目視で流星と流星以外と仕分けしなくてはならない。その手間を含んでもUFOCaptureの使用で流星と流星痕の抽出効率が格段に向上した。

AVIファイルからビデオ時間分解能(1/30秒)で流星の位置測定をするため、フリーウェア“Bara-Baby AVI”を用いて1フレーム毎の静止画(BMPファイル)に分割、さらにフリーウェア“IrfanView”を用いてデータ形式をBMPから低圧縮のJPEGに変換した。これは位置測定ソフトウェア“PicturePosition”(宮本 篤, 2004, private communication)で読み取り可能にさせるためである。PicturePositionを用いて、1300フレームを超える短痕画像を丹念に1フレームずつ位置測定を行った。最終的に短痕の抽出と測定専用のソフトウェア開発に時間や労力を費やすことなく、シェアウェアおよびフリーウェアの活用で効率的に作業を実施できた。

解析では、183分間のビデオテープから比較的流星の出現数が多い18日17時48分～19時48分 UT(日本時間2時48分～4時48分)の120分間を選んだ。77流星が同時観測され軌道が計算されている。内訳はしし座流星群に属する流星が29例。しし座流星群以外の流星が48例であった(重野)⁽¹⁰⁾。

120分間の動画からUFOCaptureを使い、44例の流星(しし座流星群に属する流星29例、しし座流星群以外の流星15例)を抽出し、うち26例が短痕を伴っていた。26例中18例がしし座流星群起源の流星発光に伴う短痕で、残り8例はしし座流星群以外の流星(散在流星)を起源とする短痕であった。短痕を生じた流星をここでは母流星と呼ぶ。母流星と短痕の一覧表を表1に掲載する。

歴史的に永続流星痕や短痕は眼視観測者により目撃されている。短痕と永続流星痕をひとまとめにして有痕率(観測された流星数に対する痕を残した流星の比率)として記録されている。眼視観測に倣い、2001年しし座流星群観測におけるIIビデオカメラ動画像からUFOCaptureを用いて抽出した流星による有痕率を記すと、しし座流星群について $18/29 = 62.0\%$ 、しし座流星群以外では $8/15 = 53.3\%$ となった。

4. 短痕の発光高度とその変化

観測例として2001年11月18日18時22分27秒 UTに出現した絶対等級-1.3等級の流星出現0.1秒後から2.4秒後までの0.1秒毎の画像を図2に

表1 母流星と短痕一覧表。動体検出ソフト“UFOCapture”を用いて抽出した短痕と、短痕を発生させた母流星のデータ。左から番号、MSS-ID、年月日、出現時刻(UT)、しし群とその他の流星(散在流星)との区別、母流星の絶対光度、母流星の高度(発光点、消失点)、対地速度、短痕発生時の高度(上端側、下端側)、短痕最大時の流星出現および短痕出現からのフレーム数と経過時間、短痕消失直前の流星出現および短痕出現からのフレーム数と経過時間、短痕消失直前の流星出現および短痕出現からのフレーム数がカメラ写野の外から飛び込んだ時点、あるいは写野の外へ飛び出した時点における高度を示す。短痕長が短くか変化が無いものは短痕最大時の値に関してNo Record(-印)とした。

No.	MSS-ID	年月日 [UT]	流星		流星		流星		短痕発生時		短痕消失直前		短痕発生時		短痕最大時		短痕消失直前								
			出現時刻 [hhmmss]	群/散在	絶対光度 [Mag.]	母流星高度 [km]	対地速度 [km/s]	短痕高度 上端側 [km]	短痕高度 下端側 [km]	短痕高度 上端側 [km]	短痕高度 下端側 [km]	短痕出現時間経過 [s]	短痕出現時間経過 [ft.]	短痕消失直前高度 上端側 [km]	短痕消失直前高度 下端側 [km]	短痕出現時間経過 [s]	短痕出現時間経過 [ft.]	短痕消失直前時間経過 [s]	短痕消失直前時間経過 [ft.]						
1	MSSJBF	Nov.18,2001	174850	しし群	1.8	125.1 /02-	70.4	122.4	120.6	120.0 /02-	118.3	116.6	3	0.10	1	0.0	13	0.43	10	0.33	32	1.03	19	0.63	
2	MSSJBI	Nov.18,2001	175254	散在	0.5	124.2 /09-	68.2	120.5	119.9	118.1 /09-	111.9	110.9	4	0.13	1	0.0	10	0.33	6	0.20	61	2.00	51	1.70	
3	MSSJBL	Nov.18,2001	175928	しし群	0.0	111+ /94.8	69.8	111+ /110.6	111+ /98.0	108.0	106.5	1	0.03	1	0.0	8	0.27	7	0.23	54	1.80	46	1.53		
4	MSSJBO	Nov.18,2001	180640	しし群	0.3	107+ /90.4	71.4	107+ /106.5	107+ /93.5	107+ /106.3	3	0.10	1	0.0	11	0.37	8	0.27	38	1.27	27	0.90			
5	MSSJBR	Nov.18,2001	181219	しし群	-0.9	129.4 /12-	71.7	125.0	123.8	124.6 /12-	115.2	112.2	4	0.13	1	0.0	10	0.33	6	0.20	46	1.53	36	1.20	
6	MSSJBT	Nov.18,2001	181337	しし群	0.5	127.5 /05-	71.5	126.3	125.7	120.1 /05-	109.7	108.4	2	0.07	1	0.0	14	0.47	12	0.40	50	1.67	36	1.20	
7	MSSJBU	Nov.18,2001	181717	しし群	-0.5	99+ /88.2	70.2	99+ /98.0	99+ /88.6	98.2	97.1	3	0.10	1	0.0	8	0.27	5	0.17	39	1.30	31	1.03		
8	MSSJBV	Nov.18,2001	181733	散在	3.9	117.8 /97.9	64.6	113.6	111.2	-	107.0	104.9	6	0.20	1	0.0	-	-	-	-	9	0.30	3	0.10	
9	MSSJBW	Nov.18,2001	181736	散在	3.6	114+ /99.2	52.8	107.6	107.3	-	105.2	104.4	6	0.20	1	0.0	-	-	-	-	11	0.37	5	0.17	
10	MSSJBX	Nov.18,2001	181827	しし群	0.3	155.7 /22-	70.8	123.2	122.6	-	122.9	122-	13	0.43	1	0.0	-	-	-	-	16	0.53	3	0.10	
11	MSSJBY	Nov.18,2001	181909	しし群	0.0	120+ /92-	71.8	116.5	115.3	113.7	94.7	109.3	108.5	5	0.17	1	0.0	17	0.57	12	0.40	71	2.37	54	1.80
12	MSSJBZ	Nov.18,2001	181934	しし群	-6.3	123+ /93-	71.2	123+ /121.7	123+ /93-	105.6	93.7	3	0.10	1	0.0	18	0.60	15	0.50	167	5.57	149	4.97		
13	MSSJBa	Nov.18,2001	182137	しし群	-4.1	119+ /111-	72.3	119+ /118.3	119+ /111-	114.7	112.0	3	0.10	1	0.0	9	0.30	6	0.20	92	3.07	83	2.77		
14	MSSJBb	Nov.18,2001	182227	しし群	-1.3	120+ /91.2	71.3	118.8	117.8	117.1	96.0	110.0	108.0	3	0.10	1	0.0	16	0.53	13	0.43	75	2.50	59	1.97
15	MSSJBc	Nov.18,2001	182610	しし群	-3.3	173+ /128-	71.8	153.8	153.0	141.0 /128-	128.6	128-	14	0.47	1	0.0	26	0.87	12	0.40	80	2.67	54	1.80	
16	MSSJBg	Nov.18,2001	182822	しし群	2.6	105.8 /91.0	70.3	102.2	99.5	101.8	95.5	100.6	100.0	5	0.17	1	0.0	7	0.23	2	0.07	17	0.57	10	0.33
17	MSSJBp	Nov.18,2001	184245	散在	2.7	119.1 /99.2	62.7	118.3	117.7	113.3	97.1	106.4	104.8	2	0.07	1	0.0	12	0.40	10	0.33	38	1.27	26	0.87
18	MSSJBq	Nov.18,2001	184556	しし群	-0.6	137.3 /13-	71.5	126.7	124.7	124.7 /13-	115.0	113-	8	0.27	1	0.0	14	0.47	6	0.20	73	2.43	59	1.97	
19	MSSJBs	Nov.18,2001	184835	しし群	2.9	129.1 /06-	71.4	118.4	117.8	114.5	107.0	111.4	110.0	8	0.27	1	0.0	15	0.50	7	0.23	31	1.03	16	0.53
20	MSSJBx	Nov.18,2001	185700	散在	3.6	117.5 /01-	64.2	113.1	111.7	109.7	102.0	109.3	107.3	5	0.17	1	0.0	11	0.37	6	0.20	27	0.90	16	0.53
21	MSSJCI	Nov.18,2001	185824	しし群	-2.4	158.3 /14-	71.4	136.3	133.7	126.5 /14-	117.7	114-	13	0.43	1	0.0	21	0.70	8	0.27	84	2.80	63	2.10	
22	MSSJc8	Nov.18,2001	191124	散在	3.4	95+ /86.6	51.5	94.9	94.2	-	94.0	90.0	3	0.10	1	0.0	-	-	-	-	7	0.23	4	0.13	
23	MSSJcJ	Nov.18,2001	192537	しし群	-7.3	141+ /113-	69.5	141.0	139.7	134.3 /113-	115.5	114.6	3	0.10	1	0.0	17	0.57	14	0.47	137	4.57	120	4.00	
24	MSSJcM	Nov.18,2001	193204	散在	4.1	113.1 /102.6	54.3	107.6	107.3	-	106.3	104.6	5	0.17	1	0.0	-	-	-	-	12	0.40	7	0.23	
25	MSSJcR	Nov.18,2001	194517	散在	4.2	121.7 /03-	71.9	120.6	119.6	-	106.7	105.4	2	0.07	1	0.0	-	-	-	-	10	0.33	8	0.27	
26	MSSJcT	Nov.18,2001	194643	しし群	-3.4	107+ /93-	70.8	107+ /105.1	107+ /93.0	105.4	104.9	4	0.13	1	0.0	13	0.43	9	0.30	88	2.93	75	2.50		
		しし群 (n=18)			-1.17	133.5 /91.1	71.1	125.9	119.7	121.7	95.8	112.1	107.1	0.18			0.46	0.28			2.33		1.88		
		散在 (n=8)			3.25	118.9 /97.1	61.3	112.0	111.1	113.7	99.6	105.9	104.0	0.14			0.38	0.27			0.73		0.50		
		全体 (n=26)			0.17	127.3 /94.1	68.1	120.3	117.1	120.0	96.5	114.3	110.2	0.17			0.43	0.28			1.62		1.29		
		平均値																							

示す。画像上では測定した短痕の上端側を○で、下端側を×で示した。流星出現後 0.5 秒後までは流星本体の発光と短痕が写っている。×印よりも低高度側の光芒は流星本体によるものである。下端側の位置測定では出現 0.2 秒までは流星の尾(wake)と呼ばれる部分との区別は難しいので、便宜的に流星本体の光芒の最後端を測定した。

短痕の出現から消失までの全てのフレームを測定したところ、短痕は以下のような時間経過をたどることがわかった。

- (1)短痕出現・成長
- (2)短痕長の最大
- (3)短痕の減衰と消失

すなわち、流星本体の高度低下に伴い短痕発光領域の下端側は急激に伸長していく。しかし、流星本体発光の消失後は短痕発光領域の下端側が上端側に向かって徐々に短縮していく。

短痕の発生から消失までの時間経過 (1) ~ (3) の間、緩慢かつ一定な高度低下を示す上端高度に比べ、高度変化が顕著なのは下端高度である。(1)から(2)にかけて流星本体発光中は短痕の下端

高度は流星本体の発光領域(つまり流星物質の放出・散逸域)に大きく依存する。その後(2)から(3)の間、短痕の最大伸長時から減衰・消失にかけて短痕の下端高度は上端側に向かって上昇・収れんするような動きを示す。

図 3 (a)~(e)に、流星本体の発光高度と短痕の上端高度と下端高度の時間変化の詳細を示す。母流星の発光から消失、そして短痕の出現から消失までの全経過が撮影画面内に収まった 5 例である。図 3 (a)~(d)にはしし座流星群による 4 例の時間変化を、図 3 (e)にはしし座流星群以外による 1 例の時間変化を示す。図 3 (a)は 2001 年 11 月 18 日 18 時 22 分 27 秒 UT に出現したしし座流星群の流星に伴う短痕(分割した静止画を図 2 に示した)の発光高度の上端と下端の時間変化である。

短痕長最大時の上端高度と下端高度について述べる。II ビデオカメラ動画像の観測写野内に短痕長最大時の上端高度と下端高度が同時に撮影されているのは 6 例(しし座流星群:4 例、しし座流星群以外:2 例)。上記 6 例と下端高度側のみ撮影

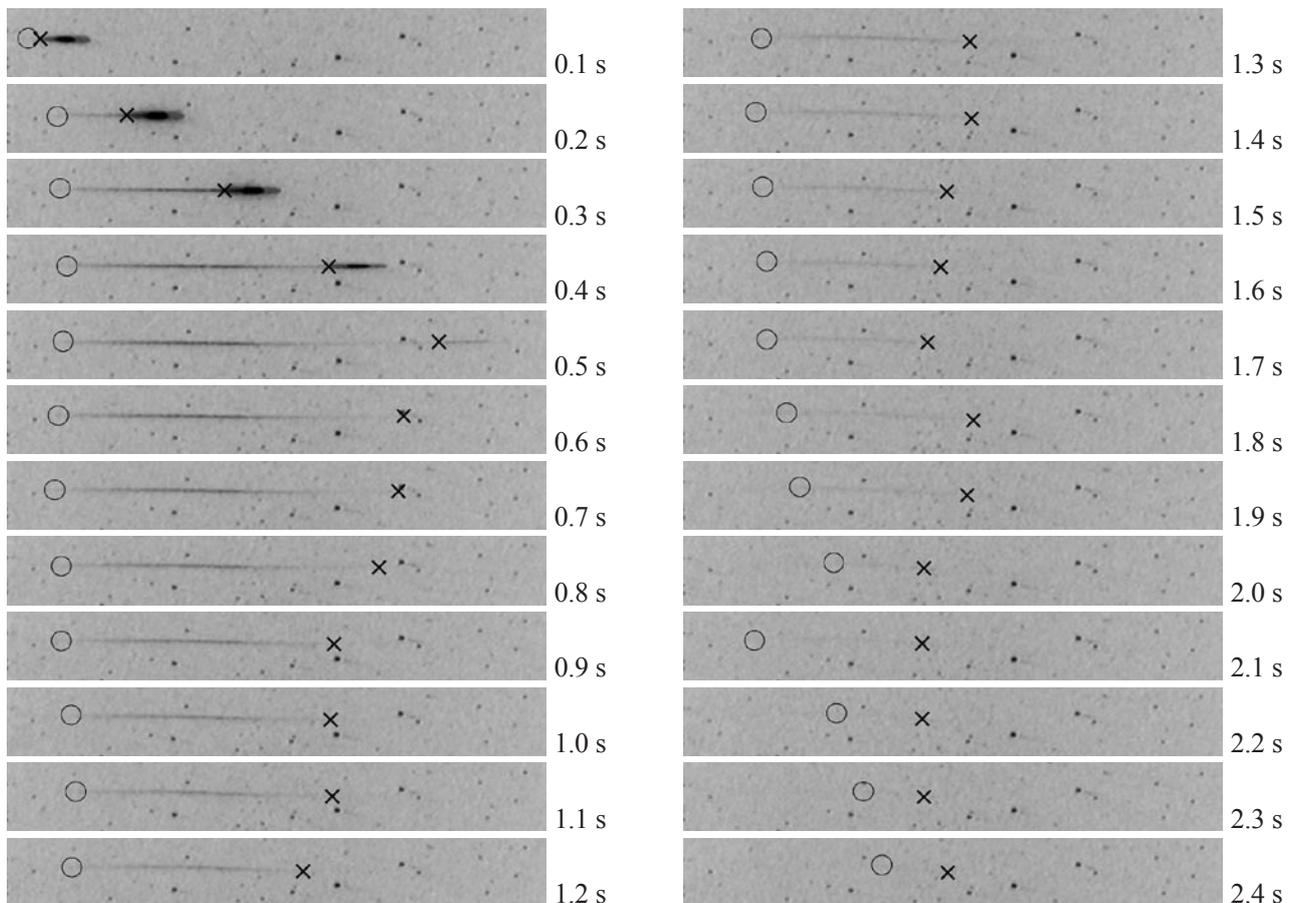


図 2 2001 年 11 月 18 日 18 時 22 分 27 秒 UT に出現したしし座流星群に属する流星と短痕。出現 0.1 秒後から 2.4 秒後まで 0.1 秒ごとの画像。流星は画像の左側から右側に流れた。○は短痕の上端側、×は短痕の下端側の測定点を示す。短痕の下端側に 0.1 秒から 0.5 秒にかけて見られる光芒は流星本体。

されている4例(しし座流星群:4例、しし座流星群以外:0例)を加えた10例(図4)を用いて短痕長最大時の上端高度と下端高度を求めた。上端高度平均は111.6 km、下端高度平均は96.4 kmである。一方、永続流星痕の発光高度は山本ら(2005)⁽¹⁴⁾の統計によれば、平均的に100.2 km ~ 86.3 kmの範囲に発光しており、今回調査している短痕に比べ有意に低高度域に位置する。

短痕の消失直前の収束領域の高度について述べる。短痕消失直前時の高度は、その時点の上端高度と下端高度の計測値の平均である。これは短痕

26例全体で平均すると107 km。しし座流星群の短痕では18例の平均で109 km、しし座流星群以外の短痕では8例の平均で106 kmであることがわかった。加えて、しし座流星群の母流星絶対等級平均は18例平均で-1.2等、しし座流星群以外の母流星絶対等級は8例平均で3.3等であった。母流星の絶対等級と消失直前時の短痕高度(図5)に示すように、それぞれ、高度109 km付近と高度106 km付近にまとまりが見られた。

なお、高度の計測誤差は流星本体で $\pm 0.2 \sim 0.3$ km(戸田ら, 2005)⁽¹⁾であり、流星痕の測定誤差も

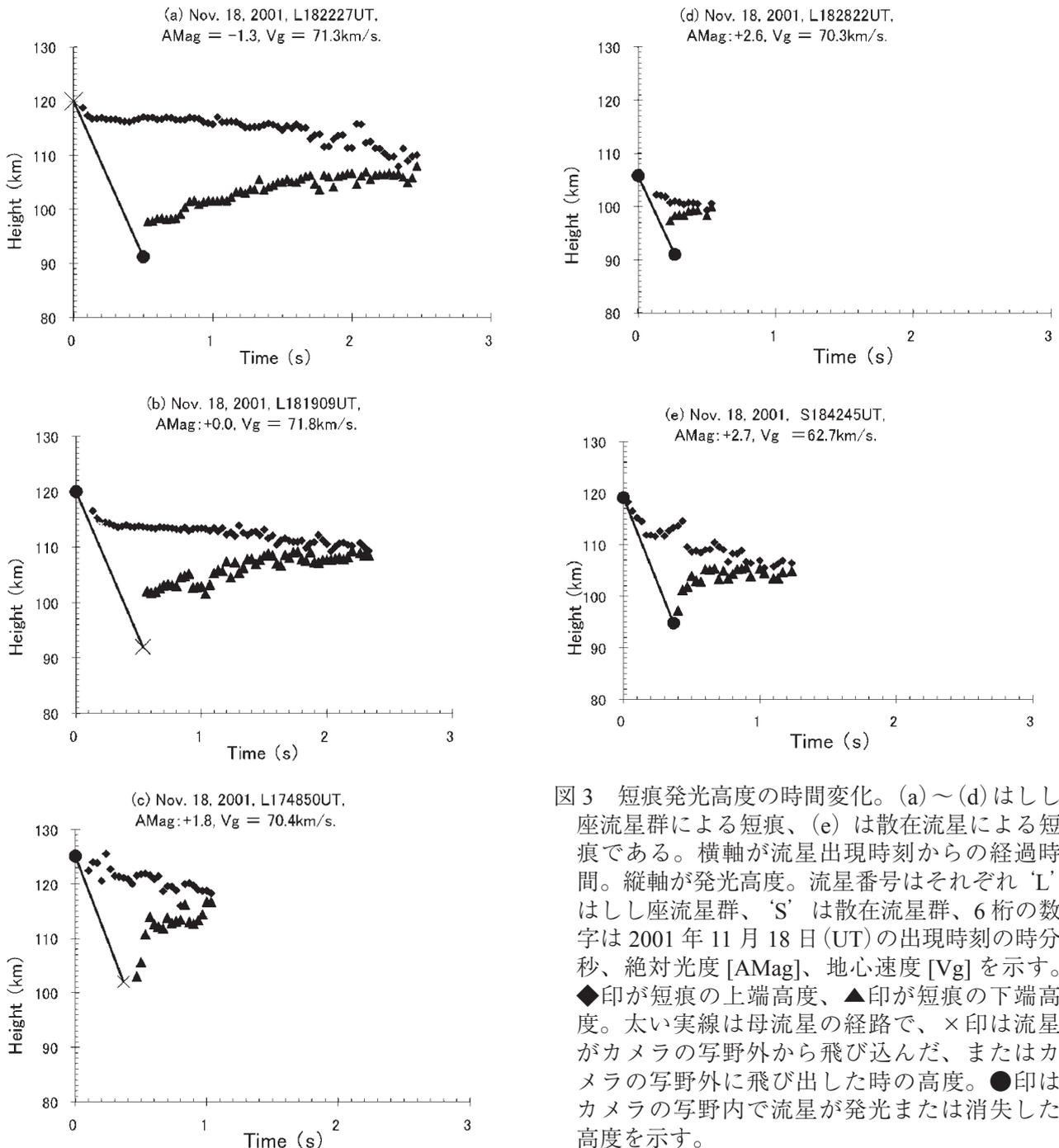


図3 短痕発光高度の時間変化。(a)~(d)はしし座流星群による短痕、(e)は散在流星による短痕である。横軸が流星出現時刻からの経過時間。縦軸が発光高度。流星番号はそれぞれ'L'はしし座流星群、'S'は散在流星群、6桁の数字は2001年11月18日(UT)の出現時刻の時分秒、絶対光度[AMag]、地心速度[Vg]を示す。◆印が短痕の上端高度、▲印が短痕の下端高度。太い実線は母流星の経路で、×印は流星がカメラの写野外から飛び込んだ、またはカメラの写野外に飛び出した時の高度。●印はカメラの写野内で流星が発光または消失した高度を示す。

これに準ずる。

5. 短痕の継続時間と母流星の絶対等級

歴史的に永続流星痕や短痕は眼視観測者により目撃され、短痕と永続流星痕をひとまとめにして有痕率（観測された流星数に対する痕を残した流星の比率）として記録され、流星群による有痕率の違いと組成の問題が推論されてきた。明るい流星ほど有痕率が高いことは眼視観測の結果よく知られている。母流星絶対等級と短痕の継続時間に高い相関があることが予想されたので、今回のデータにおいて関連を調べた。

母流星の光度の議論には、観測地と流星との距離に依存しない絶対等級（観測者の上空 100 km に流星が出現した理想的条件に換算した等級）を用いる。等級は、恒星画像について閾値以上の輝度を持つ領域の大きさとカタログ等級との相関から本観測画像上での光度を算出し、母流星の光度については更に角速度補正を行った。これに加え、流星までの距離が 100 km になるよう補正し母流星の絶対等級を得た（重野・戸田, 2008）⁽¹⁵⁾。

短痕の出現時刻から消失直前までを短痕の継続時間とした。さらに短痕の消失直前の中央高度

を調べた。中央高度はその時点における上端高度と下端高度の平均である。継続時間の議論では短痕の出現と消失が視野内に収まる例のみを使用した。測定例の内訳はしし座流星群が 8 例、しし座流星群以外が 8 例の合計 16 例である。母流星の

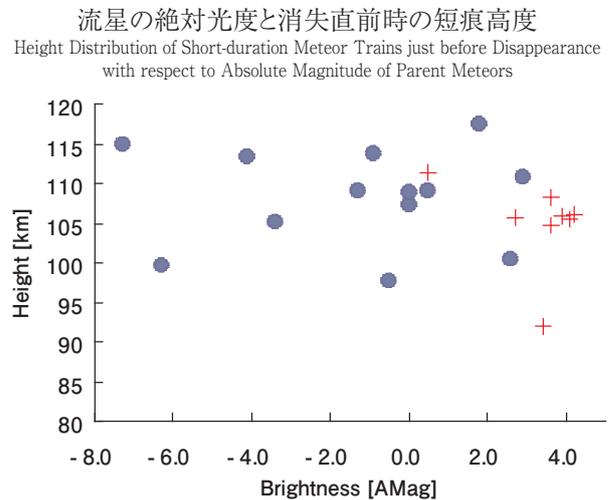


図5 消失直前の短痕平均高度と母流星絶対等級。縦軸は消失直前の短痕の上端と下端の平均高度 [km]、横軸は短痕を生成した母流星の絶対等級 [AMag]。黒丸はしし座流星群、+印はしし座流星群以外。26 例のうち消失直前の短痕の上端および下端高度の双方とも II ビデオカメラ視野内にあるものを用いた。

短痕最大伸長時の上端高度と下端高度と母流星絶対等級
Upper and Lower Height of Short-duration Meteor Train at the Maximum
with respect to Absolute Magnitude of Parents Meteor

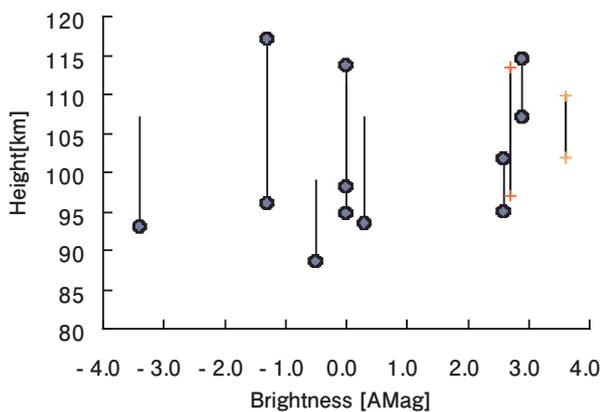


図4 短痕最大伸長時の上端高度と下端高度と母流星絶対等級。縦軸は高度 [km]、横軸は短痕を生成した母流星の絶対等級 [AMag]。黒丸はしし座流星群、+印はしし座流星群以外。短痕最大時において上端および下端高度の双方とも II ビデオカメラ視野内にあるものと、下端高度が II ビデオカメラ視野内にあるものを用いた。2つの黒丸およびプラス印を細い線で結んだものは同一短痕の上端高度と下端高度である。細線が途中で切れているのはカメラ視野外を示す。

母流星絶対等級と短痕の継続時間の相関
Absolute Magnitude of Parent Meteors with respect to
Duration Time of Short-duration Meteor Trains

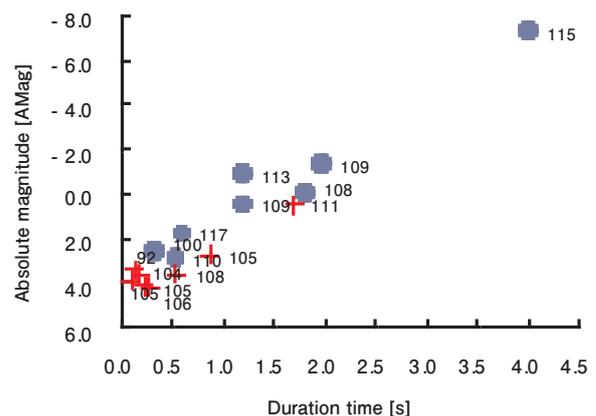


図6 母流星絶対等級と短痕の継続時間。縦軸は母流星の絶対等級 [AMag]、横軸は短痕の継続時間 [s]。黒丸はしし座流星群、+印はしし座流星群以外。26 例のうち消失直前の短痕の上端および下端高度の双方ともカメラ視野内にあり高度が求められた例をプロットした。隣に付した数字は短痕の消失直前時点での上端高度と下端高度との平均高度。

絶対光度と短痕の継続時間には明らかな相関が見られた。すなわち、しし座流星群に属する流星だけでなく、他の流星も母流星絶対等級が明るければ短痕の継続時間も長くなる(図6)。

母流星の発光継続時間が短痕の発光継続時間に影響を及ぼすだろうか？流星の継続時間を求めるには、母流星の発光から消失まで撮影画面内に収まった例を使う。しし座流星群4例としし座流星群以外2例の合計6例とデータ数が少ない点是否めないが、わずかながら相関が見られた。それ以上に、母流星の発光継続時間よりも母流星絶対等級の明るさが、短痕の継続時間の長さに貢献しているように見える(図7)。この件については今後のデータの蓄積でより明確にしたい。

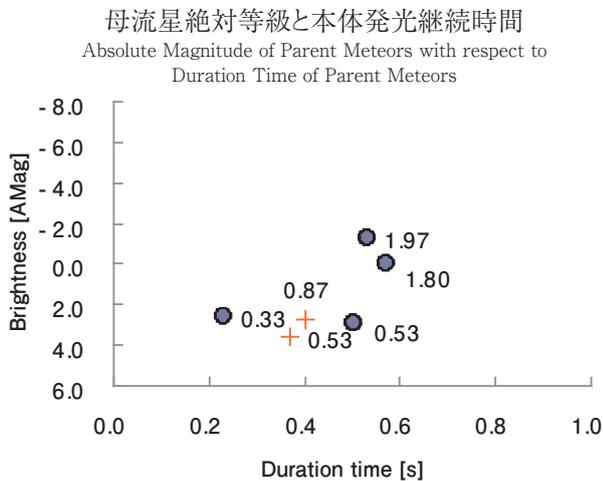


図7 母流星絶対等級と本体発光継続時間。縦軸は短痕を生成した母流星の絶対等級 [AMag]、横軸は母流星本体の発光継続時間 [s]。黒丸はしし座流星群、+印はしし座流星群以外。26例のうち母流星の発光と消失の双方がIIビデオカメラ視野内にあるものを用いた。プロット印の隣の数字は短痕の発生から消失までの継続時間 [s]。

6. 議論

IIは光増幅に蛍光面への電子の衝突を利用する性格上、視野内を明るい光点が通過すると残光が残ることがあり、今回の短痕の測定のように継続時間の短い対象においては注意を要する。流星本体通過直後の短痕の下端側では特に残光の影響を受けやすいとも考えられる。そして毎秒71 kmの速度を持つしし座流星群ではビデオ時間分解能1/30秒をもってしても、コマ送りの静止画中に本体を静止させることは出来ない。流星本体や光芒

が1/30秒間に移動した分だけ伸びて記録される。実際には1/60秒の偶数、奇数の各フィールドによるインターレースを採用しているビデオ記録方式による影響も見られる。今回の解析では図2で示すように、流星本体の光芒の外側を短痕の下端高度として測定出来ているため、残光の影響は予想されるほど小さくなく、測定誤差の要因にはなり得ない。経路途中で爆発的に発光する例においても、該当高度での残光の影響は測定に影響を与えるほどには見られなかった。

短痕の発光は波長557.7 nmの中性酸素原子(OI)と考えられ、阿部ら(2005)⁽⁴⁾により報告されている貴重な1例の分光観測解析でも永続流星痕高度より明らかに上空で、少しの間残る発光成分は557.7 nmのみであった。OI(557.7 nm)の励起状態特性寿命は0.7秒とされている(NIST Atomic Spectra Database Line Data)⁽¹⁶⁾。今回の26例(しし座流星群18例、散在流星8例)の短痕発光継続時間はほとんど1秒以上であり、3秒以上発光が認められた例もある。MSX衛星による研究例(Carbary et al., 2003)⁽¹⁷⁾でも3秒程度の発光が報告されている。

我々の結果は分光観測でないため、発光成分が557.7 nmでない可能性や557.7 nm以外の成分が同時に含まれる可能性を否定するものではない。そして、OIの励起状態特性寿命は短痕発光の継続時間に直接対応していない。むしろ流星通過後には加熱された中性大気分子・原子やプラズマが発生するため、中性酸素原子へのエネルギー供給が少しの間続けば発光がより長く継続すると考えられる。

我々のデータから、短痕を生成した母流星絶対等級と短痕の継続時間との相関を見いだした(図7)。母流星の絶対光度が暗いと短痕の継続時間が短く、その逆だと短痕の継続時間は長くなる。それは今回観測された短痕を生成した母流星の殆どに当てはまる。

流星から短痕・永続流星痕にいたる過程について述べた先行研究がある(例えば阿部ら, 2002, Borovička, 2006)^(18,19)が、短痕について発光高度・継続時間・時間変化について踏み込んだ記述はあまり無い。我々はしし座流星群の2001年大出現における短痕の発光高度と時間変化についてまとめた。これは光学観測で世界初の試みである。特に短痕の上端側と下端側で発光の減衰または発光高度幅の収れんする特性が明らかに異なる様子は興味深い。上端が時間に対し1次関数的なのに対

し、下端は対数関数的に変化するように見える。

また短痕最大時の下端高度で高度 88 km 以下での発光例が無い事実も興味深い (図 4)。流星物質が軌跡上に等方密度拡散すると仮定すれば、面積拡散により $1/r^2$ に比例するが、高度方向に指数関数的に異なる背景大気密度の変化により OI 発光の励起状態特性寿命 0.7 秒以内に励起状態の酸素原子が周辺大気分子と衝突再結合して発光出来なくなる (クエンチング) 確率は上空になるほど少なくなる。

OI 557.7 nm はオーロラグリーンラインの発光として良く知られているが、オーロラ粒子の降り込みに対しても通常 100 km 以上でしか発光出来ない。本研究により得られた高度分布の時間変化は OI 557.7 nm の発光として説明でき、大気化学においても重要な示唆に富む。電波観測では Chapin and Kudeki (1994) ⁽²⁰⁾ が 1990 年 8 月にペルーのヒカマルカ (Jicamarca) 電波観測所にて流星ヘッドエコー観測を行い、詳細なエコー特性を報告している。彼らの論文中のエコー特性図 (Chapin and Kudeki (1994) ⁽²⁰⁾ Fig.4 参照) と我々の求めた短痕の上端側発光高度とその時間変化 (図 3) とは一見よく似た傾向を示しており興味深い。光学観測で記録された短痕は中性の酸素原子 (OI) と考えられ、レーダーエコーとして検出出来るのは流星物質が高温で解離・電離した結果のプラズマであり、両者は明確に異なる。しかしながら高度 110 km 付近では電離大気と中性大気はお互いの衝突によりほぼ同じ動きをしており、関連性の研究は興味深い。

今後の発展形として過去 16 年にわたり重野により蓄積された良質な II ビデオアーカイブスを用いて、しし座流星群だけでなくペルセウス座流星群、ふたご座流星群などの安定した出現が観測された流星群で、短痕発光高度および時間変化の特性を統計的に明らかにしたい。また国内流星観測者による過去データを探索 (データマイニング) すれば、滋賀県信楽の京都大学 MU レーダーと II ビデオの同時観測など電波観測との比較を議論できる例を見いだせる可能性もある。

7. 結論

まとめとして、II ビデオカメラにより流星雨出現の夜に計画的に 2 点同時観測された良質な流星観測画像データから、連続する 2 時間に記録された 26 例の短痕と母流星のデータを抽出した。得られた知見を以下まとめると、

- (1) 短痕の発光高度の経時変化を精密に測定した。短痕は平均的に高度 111.6 km から 96.4 km の範囲で発光し、その高度は時間経過とともに消失直前には高度 107 km 付近に収れんするように変化することが確認された。
- (2) 母流星絶対等級と短痕継続時間には高い相関があることがわかった。母流星絶対等級の値に関わらず短痕発光は高度 107 km 前後で収束することもわかった。
- (3) 短痕上端の高度変化は直線的かつ緩慢で、下端高度の変化は時間経過につれて対数関数的かつ漸近的に上昇することがわかった。これらは OI 557.7 nm 発光の大気依存とクエンチングで説明出来そうであることが示唆された。
- (4) 本研究は OI 557.7 nm 禁制線発光過程の経時変化を知る貴重な観測であると言えるだろう。

謝辞

本稿の改訂にあたって査読者として有益なコメントをくださった長妻 努氏 (情報通信研究機構) と渡部潤一氏 (国立天文台) に感謝する。本報告をまとめるにあたり、阿部新助氏 (国立中央大学・台湾)、前田幸治氏 (宮崎大学)、鈴木 智氏 (日本流星研究会)、春日敏測氏 (西オントリオ大学・カナダ)、石原良明氏 (国立天文台)、比嘉義裕氏 (日本流星研究会) より貴重なコメントをいただいた。本研究は平成 19 年度の文部科学省科学研究費補助金 (奨励研究) 「流星出現直後に発生する短痕の研究」 (課題番号 19914025、研究代表者: 戸田) と国立天文台共同研究費 (研究代表者: 山本) の成果の一部である。

文献

- (1) M. Toda, M.-Y. Yamamoto, Y. Higa, and J.-I. Watanabe, "Catalogue of Persistent Trains I : Meteor Train Images during 1986-1997 and the Development of an Optimum Observation Technique," Publ. Natl. Astron. Obs. Japan, Vol.7, 53-66, 2004.
- (2) C. C. Trowbridge, "Physical nature of meteor trains," Astro Phys. J., Vol.26, 95-116, 1907.
- (3) K. Nagasawa, "Analysis of the spectra of Leonids meteors," Tokyo University Tokyo Astronomical Observatory Annals. Second Series, Vol. 16, No.

- 4, 157-187, 1978.
- (4) S. Abe, N. Ebizuka, H. Murayama, K. Ohtsuka, S. Sugimoto, M.-Y. Yamamoto, H. Yano, and J.-I. Watanabe, J. Borovička, "Video and Photographic Spectroscopy of 1998 and 2001 Leonid Persistent Trains from 300 to 930nm," *Earth, Moon, Planets*, Vol.95, 265-277, 2004.
 - (5) M. Toda, M.-Y. Yamamoto, Y. Higa, and M. Fujita, "Meteor train observation (METRO) campaign in Japan I : Evolution of the campaign and observation results during 1998-2001," *Inst. Space Astro. Sci. Rep. SP*, Vol.15, 229-236, 2003.
 - (6) Y. Higa, M.-Y. Yamamoto, M. Toda, K. Maeda, and J.-I. Watanabe, "Catalogue of Persistent Trains II : Images of Leonid Meteor Trains during the METRO Campaign 1998-2002," *Publ. Natl. Astron. Obs. Japan*, Vol.7, 67-131, 2005.
 - (7) M.-Y. Yamamoto, M. Toda, Y. Higa, M. Fujita, "METRO campaign in Japan II : Three-dimensional structures of two Leonids meteor trains in early stage," *Inst. Space Astro. Sci. Rep. SP*, Vol.15, 237-244, 2003.
 - (8) Y. Higa, M. Toda, M.-Y. Yamamoto, M. Fujita, S. Suzuki, K. Maeda, and Y. Ishizuka, "METRO campaign in Japan III: High-resolution images obtained in the campaign and morphology of the meteor train," *Inst. Space Astro. Sci. Rep. SP*, Vol.15, 242-252, 2003.
 - (9) 比嘉義裕, "流星痕の輻射点高度別および母流星絶対光度別形態分類," *天文月報*, 2006年7月号, 400-401 ページ.
 - (10) 重野好彦, "軌道要素と輻射点一覧表 (Orbital elements of all meteors)," (URL = <http://meten.net/meteor>).
 - (11) Y. Shigeno, H. Shioi, T. Shigeno, "Radiants and orbits of 2001 Leonids," *Inst. Space Astro. Sci. Rep. SP*, Vol.15, 237-244, 2003.
 - (12) H. Ogawa and S. Uchiyama, "The 2001 Leonids meteor storm over Japan," *WGN*, Vol. 29, 206-213, 2001.
 - (13) SonotaCo, "A meteor shower catalog based on video observation in 2007-2008," *WGN*, Vol. 37, No.2, 55-62, 2009.
 - (14) M.-Y. Yamamoto, M. Toda, Y. Higa, K. Maeda, and J.-I. Watanabe, "Altitudinal Distribution of 20 Persistent Meteor Trains: Estimates Derived from METRO Campaign Archives," *Earth, Moon, Planets*, Vol.95, 278-288, 2005.
 - (15) Y. Shigeno and M. Toda, "Comparison of TV magnitudes and visual magnitudes of meteors," *WGN*, Vol. 36, No.4, 79-82, 2008.
 - (16) National Institute of Standards and Technology, "Atomic Spectra Database Line," (URL = http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html).
 - (17) J.F. Carbary, D. Morrison, G.J. Romick, and J.-H. Yee, "Leonid meteor spectrum from 110 to 860 nm," *Icarus*, Vol. 161, 223-234, 2003.
 - (18) 阿部新助, 矢野 創, 海老塚昇, 春日敏測, 杉本雅俊, 渡部潤一, "流星に生命の起源を求めて," *天文月報*, 2002年11月号, 515-528 ページ.
 - (19) J. Borovička, "Meteor Trains – Terminology and Physical Interpretation," *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, Vol. 100, 194-198, 2006.
 - (20) E. Chapin and E. Kudeki, "Rader interferometric imaging studies of long-duration meteor echoes observed at Jicamarca," *J. Geophys. Res.*, Vol.99, No.A5, 8937-8949, 1994.

Measuring of short-duration meteor trains: altitude distribution of luminescence by double-station meteor observation with image intensified video cameras

Masayuki Toda*, Masa-yuki Yamamoto**, and Yoshihiko Shigeno***

(Received : April 28th, 2010, Accepted : June 13th, 2010)

*Team of the METRO / Nippon Meteor Society
1-16-13 Izumi, Suginami, Tokyo 168-0063, JAPAN
E-mail: metrotokyo_masa_toda@yahoo.co.jp

**Faculty of Engineering, Kochi University of Technology
185 Miyanokuchi, Tosayamada, Kami, Kochi 782-8502, JAPAN
E-mail: yamamoto.masa-yuki@kochi-tech.ac.jp

***Meteor Science Seminar
5-6 Kizuki-Sumiyoshi, Nakahara, Kawasaki, Kanagawa 211-0021, JAPAN

Abstract: Just after appearing of meteors, faint illuminating trails can rarely be seen along their trajectories. The luminescence, so-called meteor trains, rapidly disappear with changing their shapes in the sky. Meteor shower with the most frequent appearance rate of meteor trains is “Leonid.” In 2001, during an encounter of Leonid meteor storm in Japan, double-station observation of meteors was carried out by using image-intensified (I.I.) video cameras. Purpose of the I.I. video observation was to obtain precise trajectory parameters of Leonid meteors, however, many video clips of meteors with meteor trains of short duration within 3 s (short-duration meteor trains, hereafter) were found. By using a motion-detection software, 26 short-duration meteor trains (18 examples of Leonids as well as 8 of sporadic meteors) were successfully picked out, deriving altitude distribution of short-duration meteor trains. As a result, (1) short-duration meteor trains averagely appeared between 120 km and 96 km altitude, (2) altitude distribution of short-duration meteor trains averagely changes in time to be finally centered at around 107 km, with having linear dependence for their upper limit altitudes as well as logarithmic dependence for lower limits, (3) duration time of short-duration meteor trains was in a range between 0.1 s to 5 s, (4) high correlation between absolute magnitudes of parent meteors and duration time of short-duration meteor trains, and (5) the altitude distribution of short-duration meteor trains could be explained with OI 557.7 nm luminescence and collision (quenching) process with surrounding upper atmosphere.