

高速シャッターで見た 流星の形態

NMS/SonotaCo net 前田 幸治

観測の動機

流星の流れているときの形状を知りたい

流れ星を近くで見たらどう見えるのか？

- 眼視観測 いろんな姿に見える。実際の形や大きさは？
- ビデオ観測へ

ビデオ観測による流星の姿



- SDビデオ 720x480
インターレス 1/30s
1フレームの画像でも
1/30s間の移動分ぶれている。
解像度が低い



- HDMIビデオ 1920x1080
1/30-1/60s
解像度は上がった
時間分解能はSDと同じ

流星形状について

- 名称

本体 trail

流星体 meteoroid

尾 wake

痕 train 短痕、永続痕
本体が消えても残っている

} スペクトルで、違い分かるが、厳密な区別は困難
以前（一般的に）は、時間で区別

本体を擬似的に止めたスペクトルの変化 20151127_24mmレンズ 4K30pより切り出し

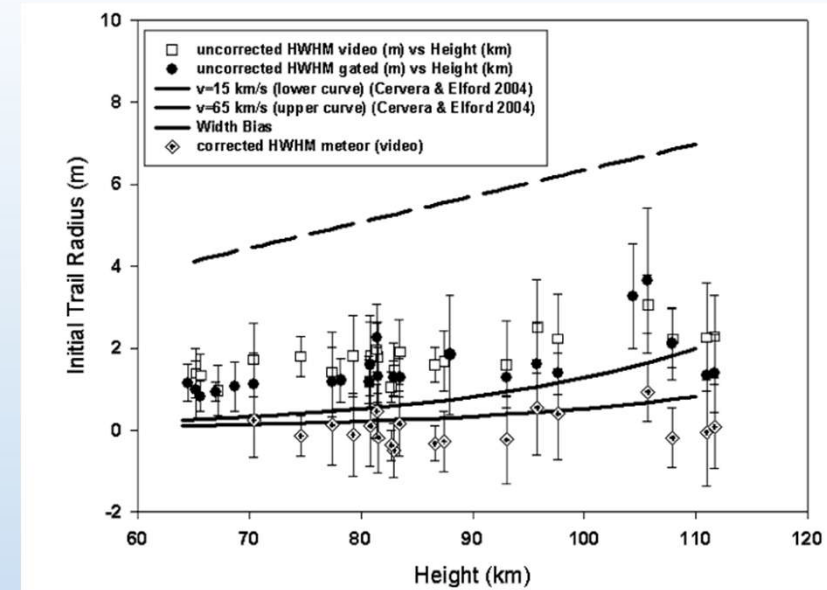
本体の後ろに
たなびいて見えるのが
wake

スペクトル↑：本体とwakeの
スペクトルは
同じ

これまでの研究 1/3

1. N.Kaiser, P.Brown, R.L.Hawkes
Optical Trail Width Measurements of Faint Meteors
Earth, Moon, and Planets(2004) 95: 579-586

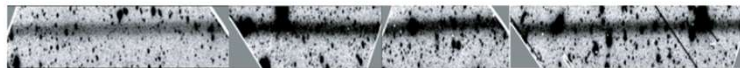
光学的に流星の経路幅を測定。40cmニュートン2台の短距離2点観測。375 HzゲートのI.I.+CCD。trailの大半は解像度限界以下で、上限値として1m未満。



2. M. IYE, M. TANAKA, M. YANAGISAWA, N. EBIZUKA, K. OHNISHI, C. HIROSE, N. ASAMI, Y. KOMIYAMA, H. FURUSAWA
SuprimeCam Observation of Sporadic Meteors during Perseids 2004
PASJ: Publ. Astron. Soc. Japan 59, 841-855, (2007)

すばるの広視野カメラで2004年PER期に視野内に偶然入った流星を解析。4-6等の13個。33ms露出、ピントはボケているが計算で発光幅を求めた。直接励起半径は2.4-10.3mm (4個)。

#17:Per



#19:Spo/P?



Table 4. Physical characteristics of meteors recorded.

(1) ID #	(2) Expstart UT h m s	(3) Band	(4) wI_p ADU	(5) Group	(6) m_5^{nom} mag	(7) Ω $^{\circ} s^{-1}$	(8) m_{vr} mag	(9) D_{col} mm
17	8/13 14 12 30	I_c	2584	Per	16.9	15.5	4.9	-
54	8/14 06 42 50	I_c	3504	Spo	16.6	10:	5.0:	-
19	8/14 10 42 21	V	11895	Spo/P?	16.4	10:	4.2	10.3
23	8/14 13 26 47	I_c	3685	Spo/P?	16.5	10:	5.0	-
25	8/14 14 33 24	I_c	8040	δAqr	15.7	10.2	4.1	-
27	8/15 05 08 13	I_c	4830	Spo/A?	16.3	10:	4.7	-
30	8/15 12 33 54	V	7875	Spo/A?	15.7	10:	4.6	6.7
57	8/15 12 33 54	V	1056	Spo/P?	19.0	10:	6.8	2.4
44	8/15 13 24 13	I_c	2280	Spo/A?	17.1	10:	5.5	-
34	8/16 10 23 14	V	1628	Spo/P?	18.5	10:	6.4	3.9
40	8/16 14 05 53	I_c	4550	Spo	16.3	10:	4.8:	-
52	8/16 14 23 56	I_c	1040	Spo/P?	17.9	10:	6.4	-
43	8/16 14 47 56	I_c	2520	Spo/P?	17.0	10:	5.4	-

これまでの研究 2/3

3. J. Borovicka, P. Spurný, and P. Koten
Atmospheric deceleration and light curves of Draconid meteors and implications for the structure of cometary dust
A&A 473, 661–672 (2007)

エロージョン（浸食）モデルを立てて、減速、wakeの長さ、ライトカーブなどを解析 → 後述

4. D. Subasinghe, M.D. Campbell-Brown, E. Stokan
High-resolution optical observations of faint meteors - I.
Light curves, any wake and fragmentation
MNRAS457, 1289–1298 (2016)

2010年4月から2014年5月、視野1.5度の自動追尾カメラ。検出された流星の質量： 10^{-7} - 10^{-4} kg、110fps、891個の選別した流星を使用。流星の形状を分類しそれぞれ、F値、軌道などを調べた。ほとんどの流星のLCは対称的でF値の平均は0.49。軌跡が連続的な断片化(fragmentation)により長く伸びた流星(90%)は、軌道より彗星起源を示唆。しかし、点状の流星のF値も約0.5を示し、差はなく、F値による起源の分類や、破碎過程の分類はできない。小惑星的軌道の流星も彗星的軌道の流星と同程度に断片化が見られた。

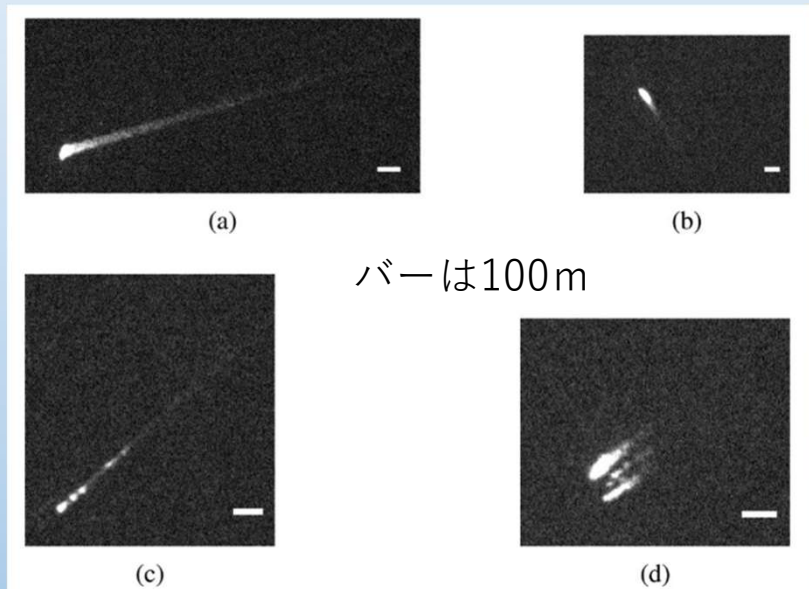


Figure 3. The different morphologies used to classify meteor events. The scale bar in each figure corresponds to 100 m. (a) shows a distinct trail (continuous fragmentation) and a smeared head, (b) shows a meteor with a short trail (negligible fragmentation) and a round head, (c) shows a meteor experiencing gross fragmentation, and (d) is a meteor showing transverse fragmentation.

これまでの研究 3/3

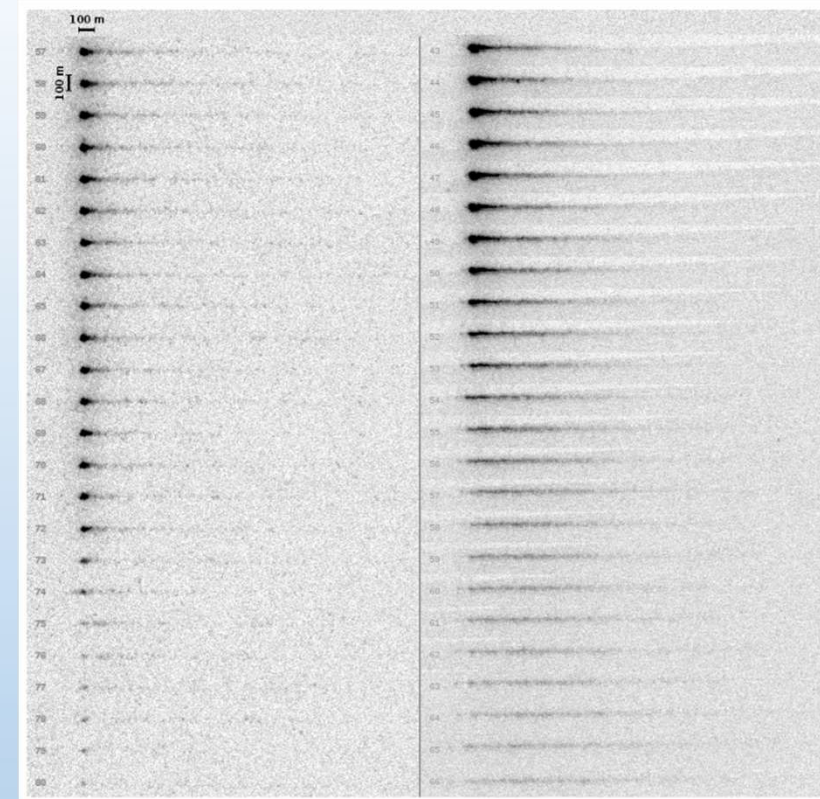
5. D. Vida, P. G. Brown, M. Campbell-Brown, R. J. Weryk, G. Stober, J. P. McCormack
High precision meteor observations with the Canadian automated meteor observatory: Data reduction pipeline and application to meteoroid mechanical strength measurements
Icarus 354, 114097(2021)

- 目的：新観測システムの紹介。流星の形態が速度、測定誤差に与える影響を調査。流星体の破砕を直接観察し、圧縮強度を推定する。
- 装置：狭視野カメラは80mm口径望遠鏡（f545mm）を使用し、実効F値はf/11、視野 $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ 。自動追尾。1秒角の分解能、100fps。

フラグメント追跡：12個に分裂した流星の個々の粒子の追跡より、逐次分裂を確認

流星体の圧縮強度測定：流星体が爆発した瞬間より推定。1つのイベントより、2-3kP。ハレー型軌道の流星はより大きい、速度が速いため精度悪い。

フラグメントの質量・サイズ分布：フラグメントの累積質量分布は、 $s=2.84 \pm 0.21$ 。



同じ α Cap 群だが
単一体型と、フラグメン
テーション型の形態を示
した流星の例

Fig. 2. Composite grey-inverted image of two meteors recorded using the narrow-field camera. Both meteors are rotated and their leading edges aligned so the evolving meteor morphology is highlighted in this vertical stack, with time increasing from top to bottom and frame number given to the left. Left: An α Capricornid recorded on August 4, 2019 at 06:02:42 UTC. Right: An α Capricornid recorded on July 27, 2019 at 04:21:22 UTC. Note that even though they are of the same origin, the meteor on the left erodes away leaving a single distinct fragment with no wake, while the one on the right completely disintegrates into a long cylinder of dust.

流星の形態から何が分かるか (概要)

形態：wakeの長さ、明るさ、時間変化から

流星体の物理的性質

もろさ（力学的な強さ）

構成粒子のサイズ

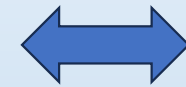
密度、空隙率...



各流星体や、流星群間の違いが現れる



母彗星の性質



軌道
構成物質

ハレータイプか、小惑星タイプ

今回の目的

- 流星のwakeについて現在の私の観測装置でどのくらい観測できるのか、テストする
フラグメンテーション過程のモデルとの比較はできそうか
- 観測方法（追加コストをあまりかけない）
 - 分解能 → 4 Kビデオ、30 fps
望遠レンズ
 - 時間分解能 → シャッター速度を上げる

- 論文紹介へ

J. Borovicka *et.al*, A&A 473, 661–672 (2007)

今回の目的

- 流星のwakeについて現在の私の観測装置でどのくらい観測できるのか、テストする
フラグメンテーション過程のモデルとの比較はできそうか
- 観測方法（追加コストをあまりかけない）
 - 分解能 → 4 Kビデオ、30 fps
望遠レンズ
 - 時間分解能 → シャッター速度を上げる

観測

観測方法

分解能 → 4 Kビデオ (3840x2160)、30 fps

望遠レンズ (85, 200mm レンズ)

時間分解能 → シャッター速度を上げる
(1/1600 – 1/3200sec)

視野 10.5x3.3
絞り F2.0

同視野のモニターSDカメラ:12mm

UFOCapture, UFOAnalyzer

観測期間

2026年1月から6月初まで

観測地

宮崎市

福岡市 (モニターSDカメラ12mm)



観測エリア

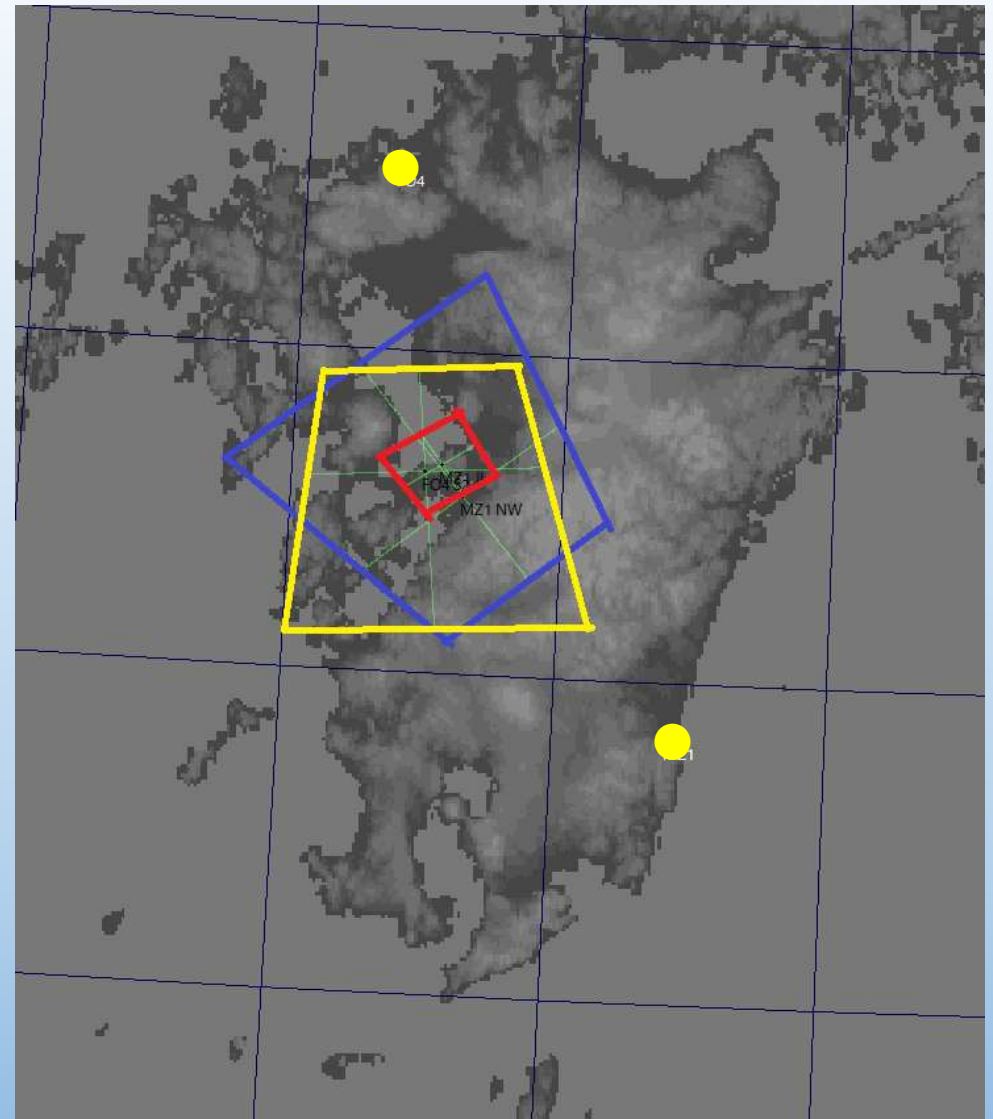
赤：200mmレンズ観測エリア（宮崎）

モニターカメラ観測エリア
12mm、SDカメラ

青：宮崎

黄：福岡

観測エリア（100km上空）



全観測 リスト 200mm

高速シャッター流星リストV1.3										200mmのみ		2026/6/28										
			1/ s		Fovh		200,8	10.471	23.6	3840.0											km	m
No.	ID	LocalTime	焦点 距離	露出時 間の逆 数	ISO	NW mag	class	Mag	Dur(se c)	AV(deg /s)	露出間の 移動ピク セル	1フレー ムの移 動ピク	仰角	ref s	sN	発 光	消 滅	備考	距離	pix当た りの長 さ		
2	6T004	20260212_032540	200	3200	32000	1.3	spo	0.8	0.50	2.0	0.2	24.1	40.4	1	14	o	o		154.3	7.4		
31	6T045	20260603_033144	200	3200	32000	1.5	spo	2.4	0.133	4.4	0.5	54	36.2	5	5	x	x		169.3	8.1		
21	6T029	20260327_233416	200	1600	32000		spo	4.2	0.167	2.6	0.6	32.2	38.7	1	6	o	o		159.9	7.6		
5	6T007	20260221_233917	200	1600	32000		spo	3.3	0.67	2.9	0.7	35.5	38.7	3	21	x	o	←	159.9	7.6		
15	6T023	20260310_025605	200	1600	32000		spo	2.6	0.234	3.0	0.7	36.5	38.3	11	8	o	o		161.3	7.7		
23	6T031	20260411_010048	200	1600	32000		spo	3	0.267	3.6	0.8	43.5	38.7	5	8	o	o	→	159.9	7.6		
30	6T044	20260523_012133	200	3200	32000		spo	2.3	0.267	7.8	0.9	95.5	39.2	8	9	o	o		158.2	7.6		
26	6T040	20260517_214016	200	3200	32000		ANT	2.9	0.4	9.9	1.1	121	39.7	8	12	o	o		156.6	7.5		
28	6T042	20260518_020239	200	3200	32000		ANT	2.4	0.267	10.2	1.2	124	39.7	5	8	o	o		156.6	7.5		
1	6T003	20260212_001418	200	3200	32000	2.1	ANT	2	0.37	11.2	1.3	137	44.9	3	12	x	x		141.7	6.8		
24	6T037	20260502_000125	200	1600	32000	-0.2	ANT	0	0.434	6.3	1.4	76.6	40.1	5	14	x	o	要フレーム分離	155.2	7.4		
17	6T025	20260310_200407	200	1600	32000		spo	2.4	0.067	6.4	1.5	78.1	37.2	0	3	o	o		165.4	7.9		
27	6T041	20260517_225454	200	3200	32000	0.5	spo	1.2	0.234	14.9	1.7	182	41.5	10	8	x	o		150.9	7.2		
3	6T005	20260212_045800	200	3200	32000	0.8	ANT	1.5	0.30	15.7	1.8	192	45.1	3	10	o	o		141.2	6.7		
12	6T020	20260308_194048	200	1600	32000		spo	3.2	0.367	8.0	1.8	97.9	40.3	7	11	o	o		154.6	7.4		
22	6T030	20260409_011400	200	1600	32000	1.8	ANT	1.4	0.133	8.1	1.9	99.6	40.6	2	5	o	o		153.7	7.3		
10	6T018	20260307_213737	200	1600	32000	1.4	ANT	1.7	0.1	8.3	1.9	101	36	14	4	o	x		170.1	8.1		
19	6T027	20260313_221032	200	1600	32000	-0.6	spo	0.8	0.167	8.8	2.0	107	35.3	9	6	x	x		173.1	8.3		
8	6T016	20260306_003320	200	1600	32000	2.3	ANT	2.4	0.367	10.0	2.3	123	38.5	3	10	o	x		160.6	7.7		
16	6T024	20260310_034053	200	1600	32000	-0.1	ANT	-0.1	0.667	11.3	2.6	139	41.2	6	21	x	x	要フレーム分離	151.8	7.2		
29	6T043	20260518_043502	200	3200	32000		spo	2.3	0.133	24.0	2.8	294	39.5	9	5	o	x		157.2	7.5		
6	6T008	20260228_223533	200	1600	32000	0.7	ANT	1.2	0.53	12.4	2.8	152	41.4	12	16	x	x		151.2	7.2		
13	6T021	20260309_235701	200	1600	32000	2.5	ANT	2.1	0.4	13.8	3.2	169	41.1	7	13	x	x		152.1	7.3		
18	6T026	20260311_035132	200	1600	32000	1.7	XHE_ja	2.2	0.2	14.4	3.3	176	37.4	6	7	o	x		164.6	7.9		
4	6T006	20260221_230851	200	1600	32000	2.2	ANT	2.3	0.17	17.4	4.0	212	40.5	5	6	x	o	同時	154.0	7.3		
14	6T022	20260310_020626	200	1600	32000	1.0	spo	1.7	0.167	17.4	4.0	213	41.1	9	5	x	o		152.1	7.3		
25	6T038	20260514_032705	200	1600	32000		spo	2.3	0.2	19.0	4.3	232	40.1	1	7	o	o		155.2	7.4		
20	6T028	20260314_054804	200	1600	32000		spo	3	0.1	21.7	5.0	266	38	6	4	o	o		162.4	7.8		
9	6T017	20260306_010916	200	1600	32000	-0.2	spo	2.8	0.133	22.0	5.0	269	40.4	3	5	x	x		154.3	7.4		
7	6T009	20260301_033751	200	1600	32000	0.1	spo	0.9	0.2	26.1	6.0	319	40.3	8	7	x	x		154.6	7.4		
11	6T019	20260308_044120	200	1600	32000	1.2	spo	2.1	0.1	29.8	6.8	364	39.7	9	4	o	o		156.6	7.5		

観測データの詳細

高速シャッター流星リストV1.3

200mmのみ

2026/6/28

				1/ s			Fovh	200,8	10.471	23.6	3840.0								km	m
No.	ID	LocalTime	焦点 距離	露出時 間の逆 数	ISO	NW mag	class	Mag	Dur(se c)	AV(deg /s)	露出間の 移動ピク セル	1フレー ムの移 動ピク	仰角	ref s	sN	発 光	消 滅	備考	距離	pix当た りの長 さ
2	6T004	20260212_032540	200	3200	32000	1.3	spo	0.8	0.50	2.0	0.2	24.1	40.4	1	14	o	o		154.3	7.4
31	6T045	20260603_033144	200	3200	32000	1.5	spo	2.4	0.133	4.4	0.5	54	36.2	5	5	x	x		169.3	8.1
21	6T029	20260327_233416	200	1600	32000		spo	4.2	0.167	2.6	0.6	32.2	38.7	1	6	o	o		159.9	7.6
5	6T007	20260221_233917	200	1600	32000		spo	3.3	0.67	2.9	0.7	35.5	38.7	3	21	x	o	←	159.9	7.6
15	6T023	20260310_025605	200	1600	32000		spo	2.6	0.234	3.0	0.7	36.5	38.3	11	8	o	o		161.3	7.7

中略

9	6T017	20260306_010916	200	1600	32000	-0.2	spo	2.8	0.133	22.0	5.0	269	40.4	3	5	x	x		154.3	7.4
7	6T009	20260301_033751	200	1600	32000	0.1	spo	0.9	0.2	26.1	6.0	319	40.3	8	7	x	x		154.6	7.4
11	6T019	20260308_044120	200	1600	32000	1.2	spo	2.1	0.1	29.8	6.8	364	39.7	9	4	o	o		156.6	7.5

↑ 宮崎モニタカメラでの
明るさ

↑ 流星のブレの量でソート

↑ 発光点を
100kmと
仮定

流星数31個
モニターカメラ（宮崎）に写った割合: 61%

観測結果 月別集計

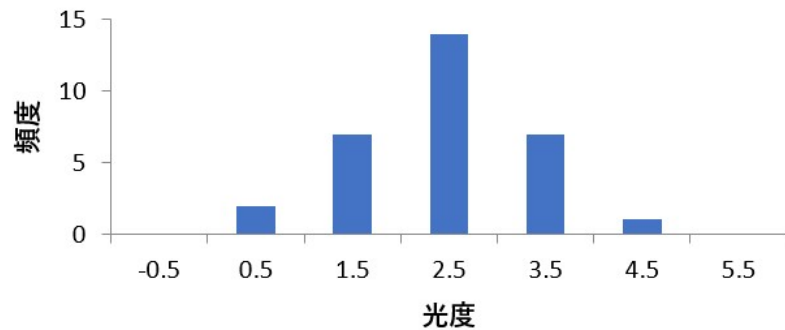
月別観測数結果							
レンズ	2026年 月	観測 日	定点観測流 星数	観測流 星個数	割合	平均	同時流星 数
85mm	1	29	726	41	4.0%	5.7%	1
85mm	2	7	99	6	7.1%		
小計				47			1
200mm	2	9	58	7	12.1%	5.1%	1
200mm	3	30	232	14	6.0%		0
200mm	4	29	161	2	1.2%		0
200mm	5	30	n/o	7			0
200mm	6	2	n/o	1			0
小計		曇り含む		31			1

観測数は、通常の
流星の5%程度

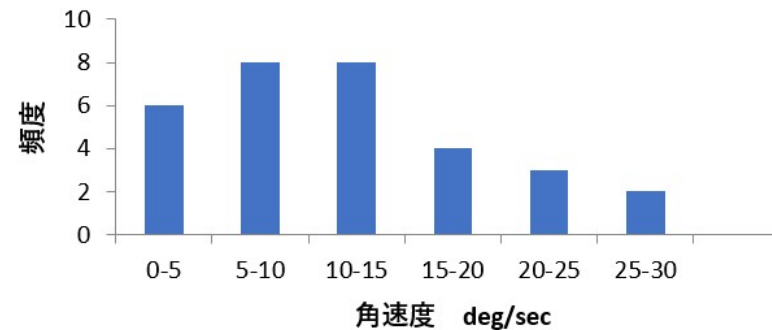
同時流星になると
3か月で1個程度と
非常に少ない

観測結果 データ統計

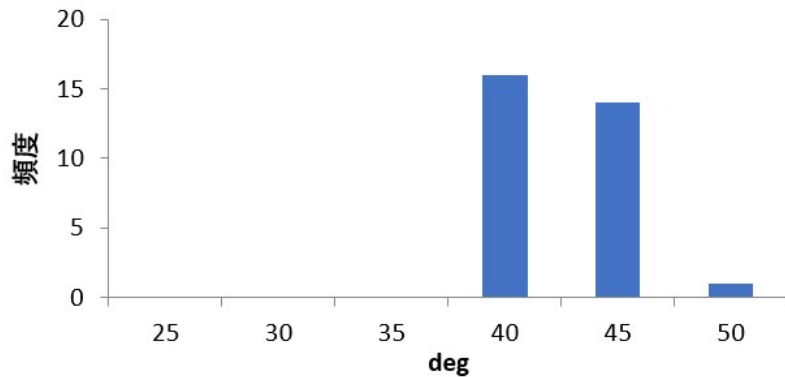
光度分布 N=31



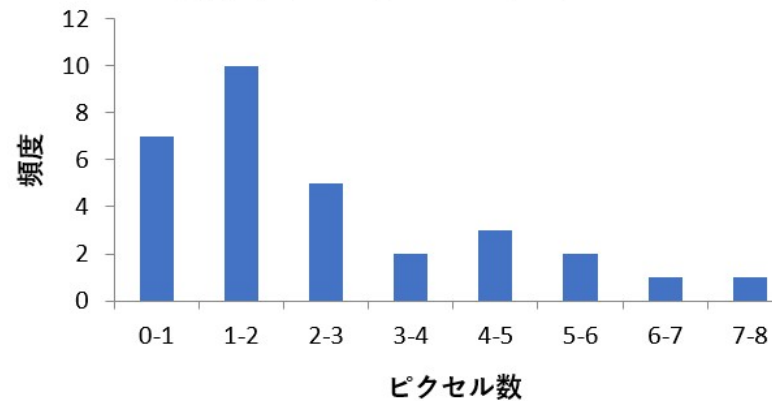
角速度分布 N=31



発光点側仰角 N=31



露出中のブレの量 N=31

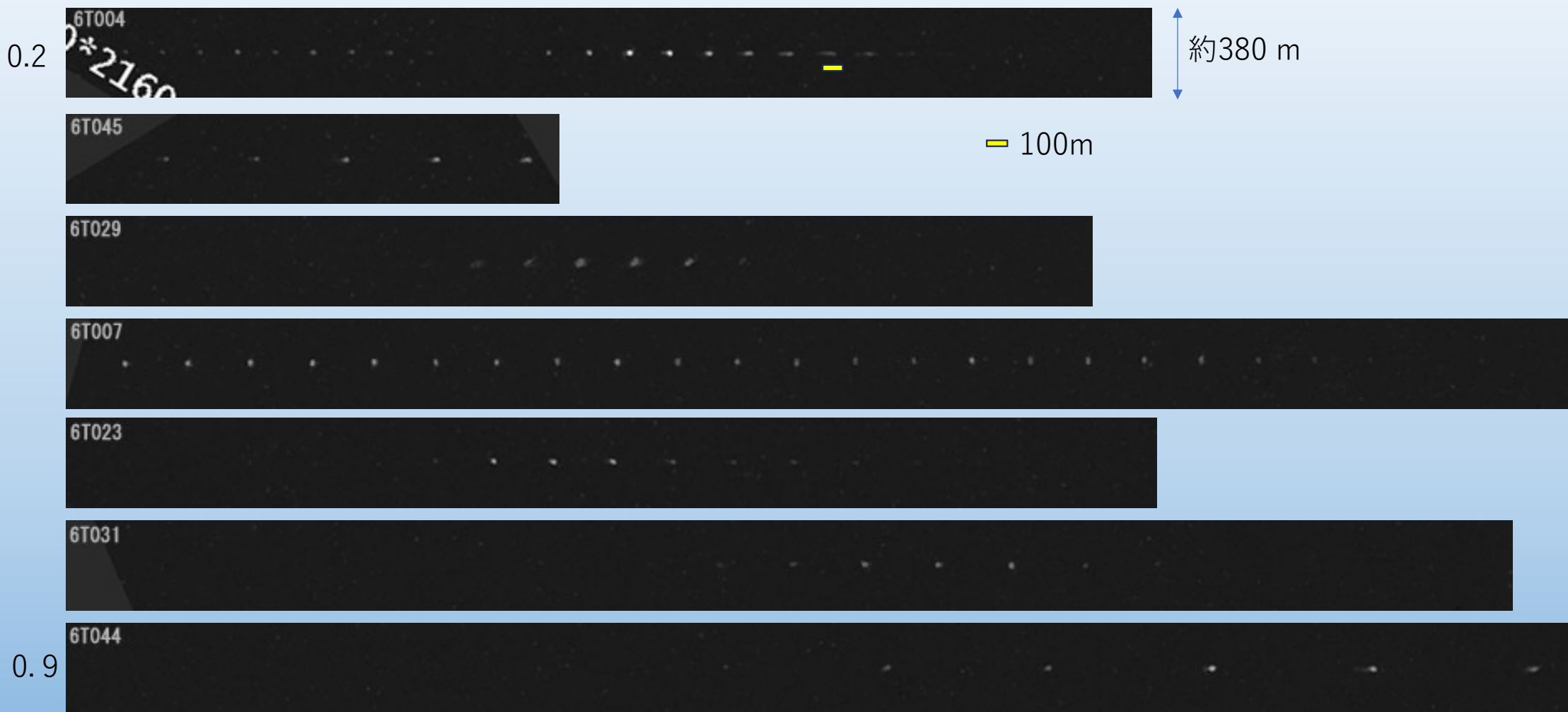


・望遠レンズだが
観測できている
流星は、通常の
観測と同等の
明るさ。

・視野を固定し
ているので、仰
角範囲は狭い

・ブレの量は2
ピクセル以下が
約半分

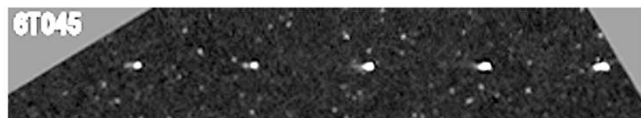
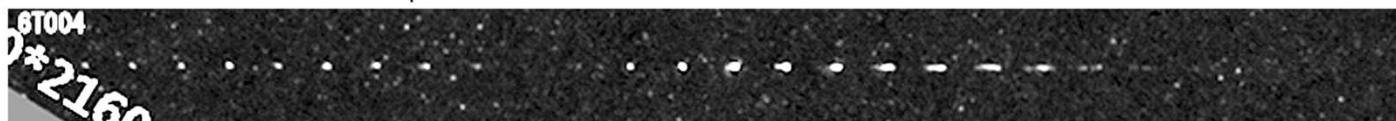
比較明の流星像 0.2-0.9 pix ブレの小さい順 1 / 4



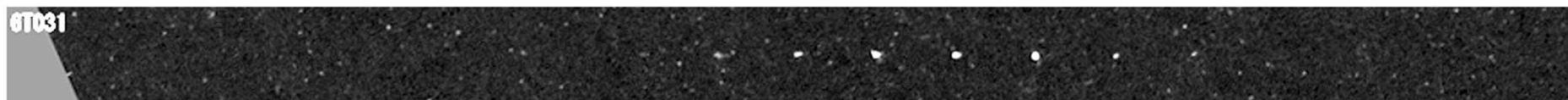
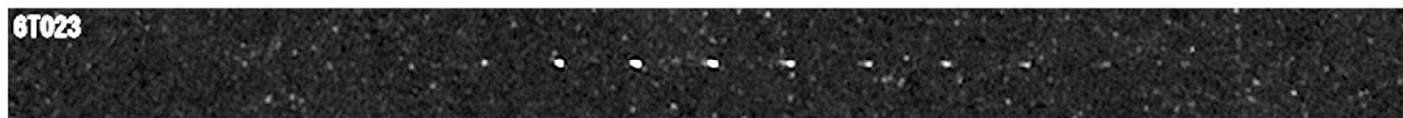
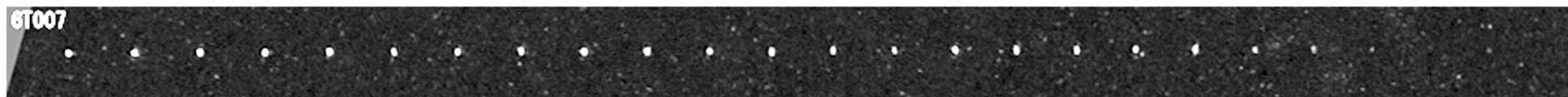
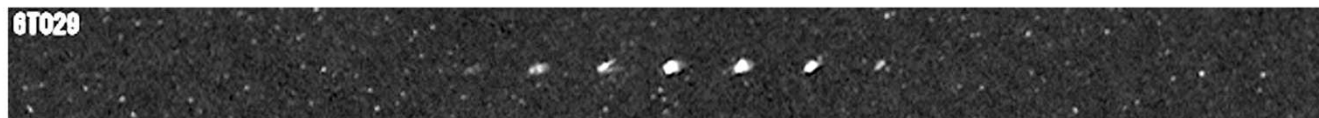
比較明の流星像 1/4

同じ画像をハイコントラスト化

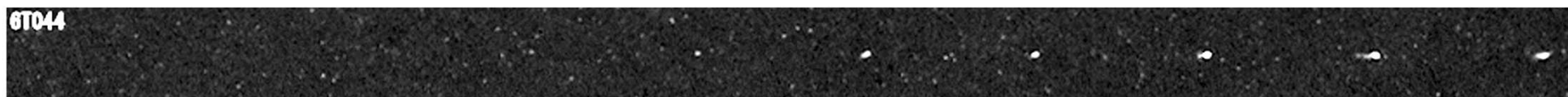
0.2



レンズの歪で星も一部円状でない



0.9



比較明の流星像

ブレの長さ 1.1-1.8 pix

2/4

1.1

6T040

6T042

6T003

6T037

wake

6T025

6T041

wake

6T005

6T020

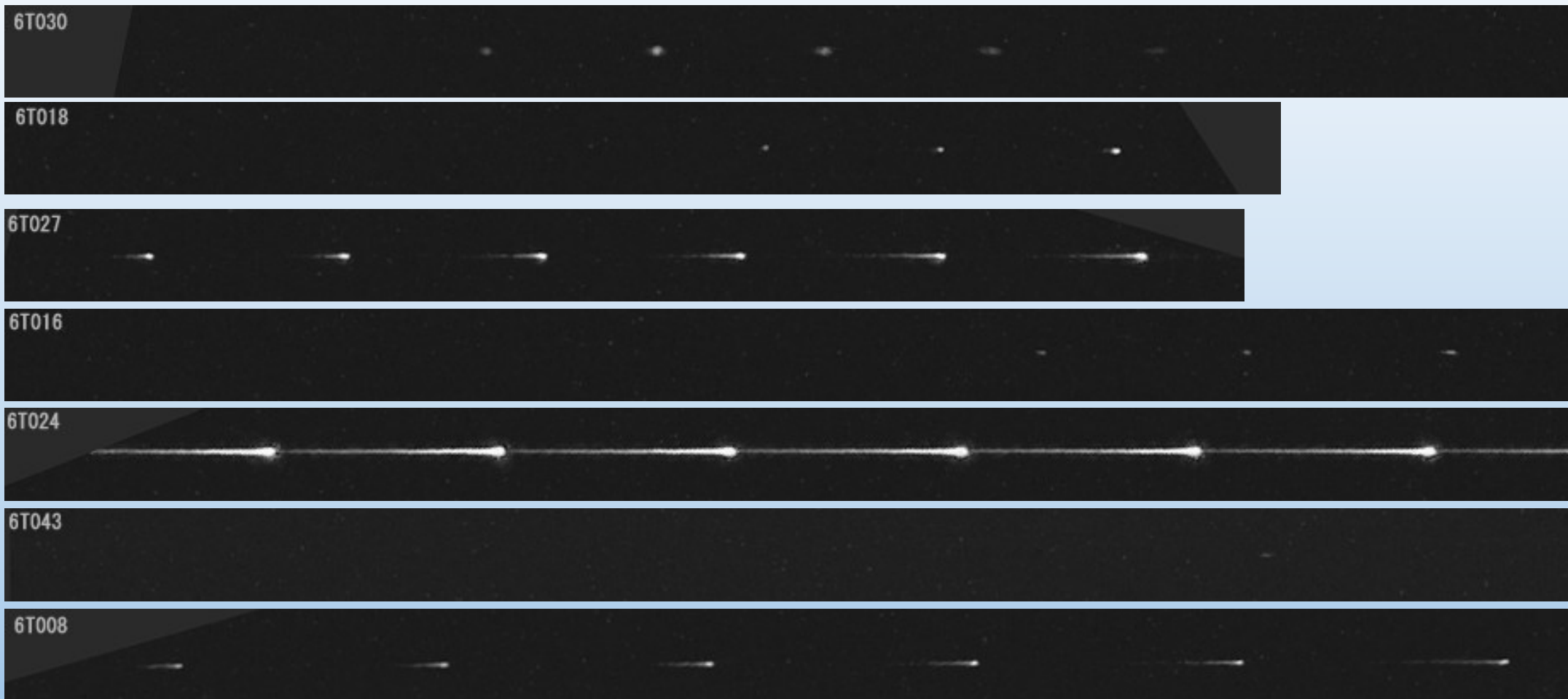
1.8

比較明の流星像

ブレの長さ 1.9-2.8 pix

3 / 4

1.9



2.8

比較明の流星像

ブレの長さ

3.2-6.8 pix

4 / 4

6T021

6T026

6T006

6T022

6T038

6T028

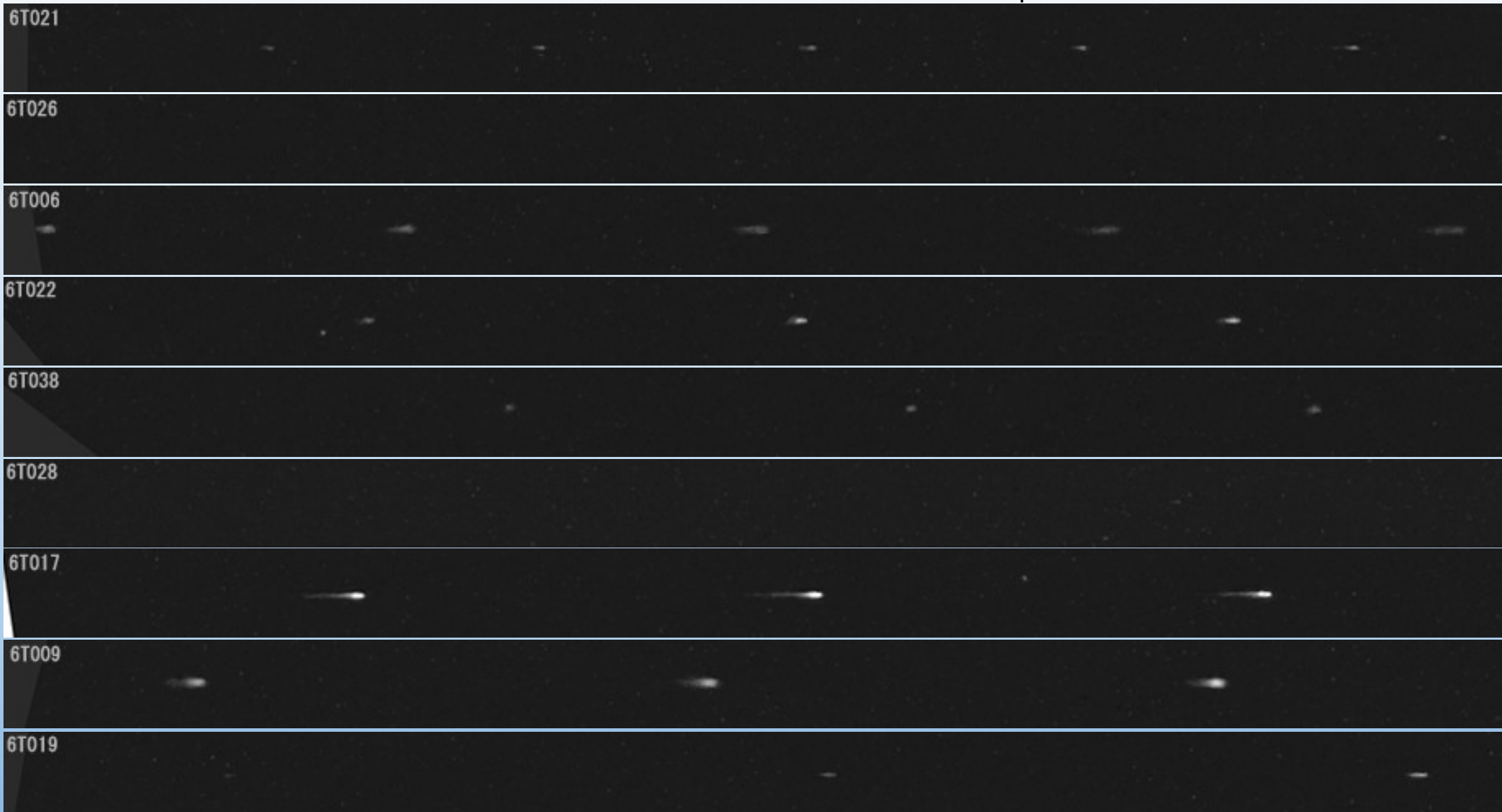
6T017

6T009

6T019

3.2

6.8



長いwake 例 1/2

ぶれ: 1.5 pix

フレーム切り出しを行い、配列

6T037

ハイコントラスト化

fno

オリジナル

fno

30m

135m

031

031

034

034

037

037

040

040

041

041

042

042

043

043

044

044

長いwake 例 2/2

ぶれ: 2.7 pix

フレーム切り出しを行い、配列

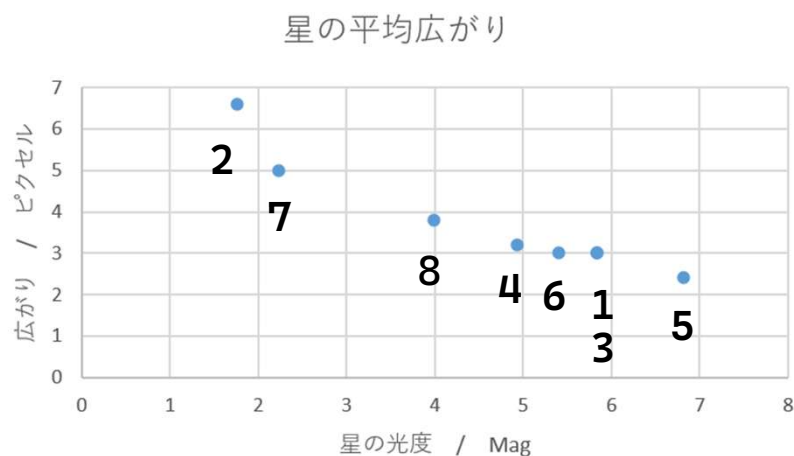
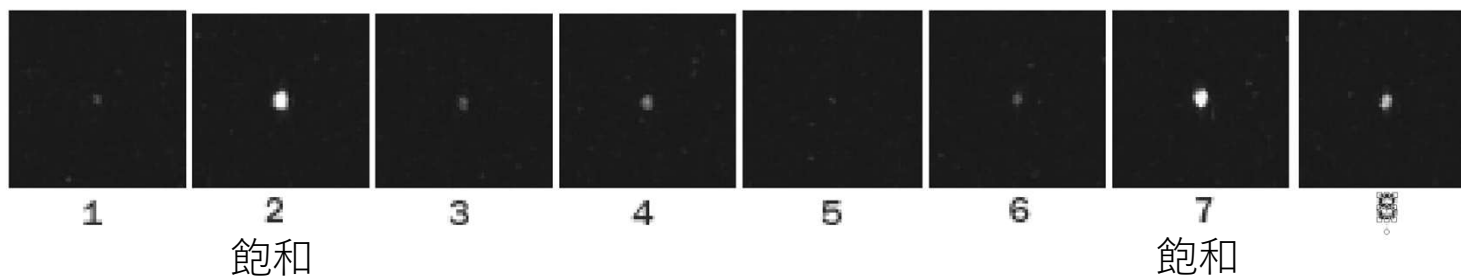
ハイコントラスト化

オリジナル

		fno	fno
6T024		032	032
		034	034
		036	036
		038	038
		040	040
		042	042
		044	044
		046	046
		048	048

解析：星像の広がり

1 フレームを切り出した星の像 (1/1600s) 200mmレンズ



星像の広がり：背景より 2σ 以上大きな部分の直径とする
5回測定のア平均 単位：ピクセル

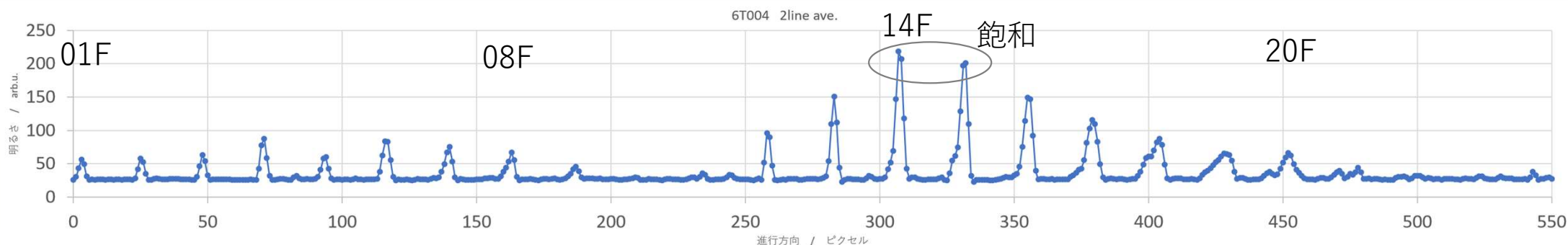
飽和していない場合：3 - 4 ピクセル、
(3等より暗い) 明るさで広がりほぼ変わらない

飽和した場合：4 ピクセル以上
(3等より明るい) 明るくなると広がる

Wakeの解析 1/2 6T004 ブレの量(0.2pix)が最小の例

6T004
2160

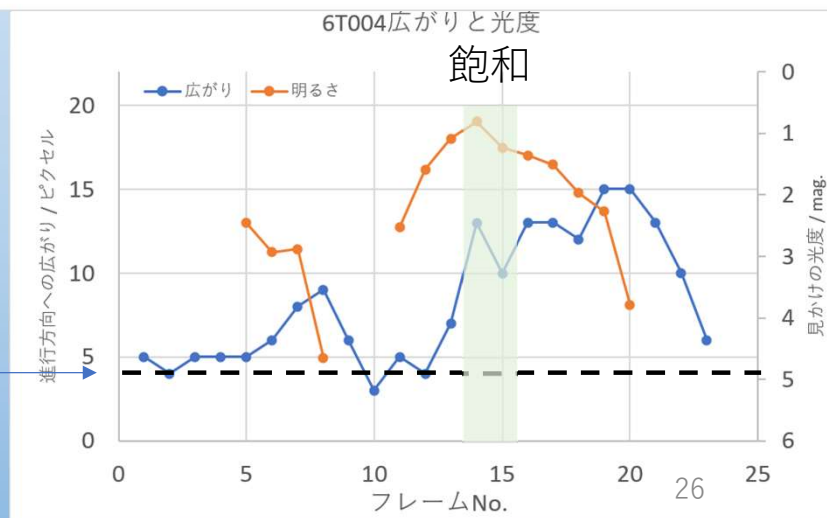
フレーム切り出しを行い、配列



背景より 2σ 以上大きな明るさの部分を流星（本体+wake）とする
ブレ：0.2 pix, 星像の広がり: 約4 pix

最大光度あたりからwakeが伸び始め、暗くなっても増加続く

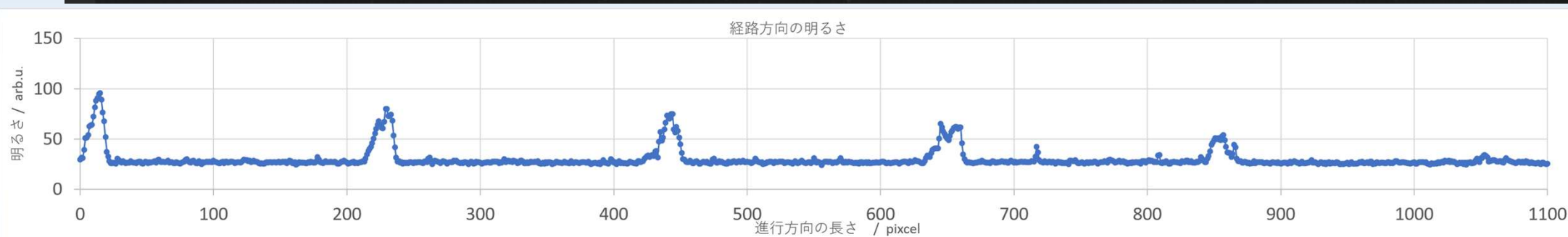
流星の明るさはUFOAnalyzerの測定値（見かけの等級）



Wakeの解析 2/2 6T006

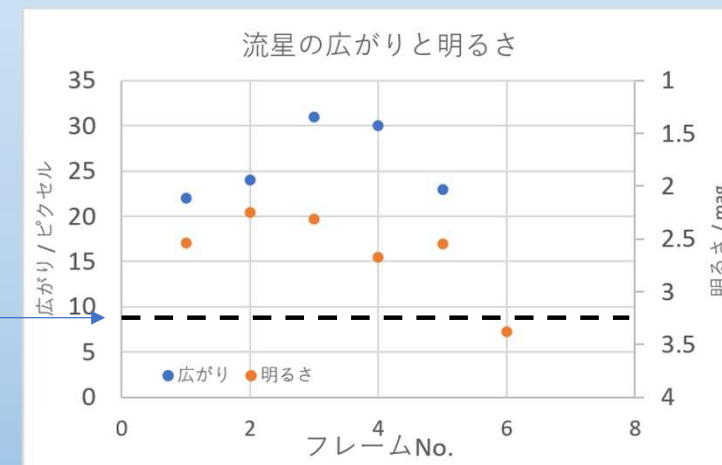
同時観測が成立した流星の例

6T006



ブレ : 4.0 pix , 星像の広がり: 約4 pix

画像は途中から (発光点は視野の外)
最大光度後に、wakeが増加



軌道要素

	a(AU)	e	q(AU)	inc.	peri.	node	amag	H1(km)	H2(km)	vg(km/s)	Tj
6T006	2.612	0.911	0.233	57.930	127.136	152.592	2.0	94.3	88.7	41.75	2.302941

木星族彗星型

まとめ

観測したい項目

- wakeの形（長さ） ○
- wakeの時間変化 ○
- 流星の光度変化 ○
- 流星の減速 △
- 発光、消滅点高さ △

Borovickaの解析を行う場合

同様の観測を行い、シミュレーションするのは、発光点、消滅点を求めるあたりが難しい

現在の問題点

明るいwakeの飽和
撮影効率が低い

発光、消滅点が視野に入らない
同時観測効率が低い
比較星が少ない
ピント合わせが難しい

各問題点に対する対策

問題点

明るいwakeの飽和 : 点像なら少々飽和しても外挿可能

撮影効率が低い : 今はそれほど問題でもない

発光、消滅点が視野に入らない : 別カメラで観測

同時観測効率が低い : 2点目のカメラの感度、視野の調整

比較星が少ない : 別カメラで対応か？

ピント合わせが難しい : ？

wakeは観測できているので、何か特徴的なパラメータだけを抽出して、物理的性質を抽出できないか？

まとめ

- 望遠レンズと高速シャッターを用いた 4 Kビデオ観測で、ほぼ流星移動のないブレのない画像は得られ、wakeの時間変化を捉えられた
- 視野の狭さ、同時観測率の低さから流星の高度や減速を捉えるのは、難しい。一般カメラの飽和のしやすさも問題
- Borovickaの方法の踏襲では、物理観測はまだ難しいが、特徴的なパラメータだけを抽出する方法で観測できないか、検討が必要

- ご清聴ありがとうございました