

きりん座流星群の予報研究

佐藤幹哉*

Research of a forecast of Camelopardalids meteor shower

Mikiya Sato*

1. イントロダクション

1-1. きりん座流星群とその母天体

きりん座流星群 (Camelopardalids) は、2014 年以前には、まとまった出現が記録されていなかった新しい流星群である。IAU (国際天文学連合) の確定流星群には含まれていないが、ワーキングリストに登録されており、流星群番号の IAU No.451 と、略号の CAM が決定している流星群である。

流星群の母天体は、リニア彗星 (209P/LINEAR) である。この彗星は、2004 年 2 月 3 日に、LINEAR プロジェクト (Lincoln Laboratory Near-Earth Asteroid Research Project) により発見された。この彗星の軌道要素を表 1 に示す。公転周期が約 5 年で、木星族の短周期彗星に分類される。近日点距離がおよそ 0.97 au であり、近日点付近で地球軌道に接近する軌道を持つ。2014 年の回帰時は、5 月 6 日に近日点を通過し地球にも接近して約 12 等級と比較的明るく観測された (ICQ, 2014)。

1-2. 先行研究

母天体の軌道が地球軌道に接近するものであったため、発見から間もなくしてすぐに流星群の出現が期待されていた。いち早く Lyytinen 氏は、1818 年以降に母天体から放出されたダストが形成するダスト・トレイルが 2014 年に接近することを見出している (Jenniskens 2006)。さらに、ロシアの Maslov 氏が 2010 年に、フランスの Vaubaillon 氏が 2012 年に、それぞれダスト・トレイルの接近による 2014 年の流星群の出現を予報している。これらを表 2 にまとめた。

Lyytinen 氏による予報では、流星群の出現規模については言及していなかったが、Maslov 氏と Vaubaillon 氏は、それぞれの研究から、ZHR (天頂修正 1 時間流星数) で数百レベルの大出現の予報を報告した (Maslov, 2010; Vaubaillon, 2012)。

1-3. 本研究の目的

このように、先行研究によってすでに予報されていたきりん座流星群ではあるが、流星群出現の起因となるダスト・トレイルを形成するダストの放出時期は、母天体の発見前であった。一般的に母天体発見前の軌道については、時期が遡るにつれて誤差が増加し、不確定要素が大きくなるため、シミュレーション計算によるダスト・トレイルの位置にも不確定要素が含まれる可能性が高くなる。実際に先行研究 3 者による予報は、微妙に差が生じている。そこで、別の軌道要素を用いて 2014 年のダ

表 1. リニア彗星 (209P) の軌道要素.

項目	各値
近日点通過 (T)	2014 May 6.32419
近日点距離 (q) AU	0.9694580
離心率 (e)	0.6725839
近日点引数 (ω) °	152.39315
昇交点黄経 (Ω) °	62.82447
軌道傾斜 (i) °	21.24342

Kinoshita (2012) より

スト・トレイルの位置をさらにシミュレーションすることは、予報全体の情報量を増やすために必要な状況であった。

また、発見前の母天体では、その彗星活動度自体が不明であるため、ダストの放出量は未確定の状況になる。一方で、先行研究の予報出現数は大変多く、一般層が大きく注目するレベルに達していた。このような状況下であったため、さらに出現数の予報情報を増やすことは、有用であると判断された。

以上により、先行研究による予報はあったものの、リニア彗星からのダスト・トレイルをシミュレーション計算し、2014 年のきりん座流星群の予報に対する情報量

表 2. 先行研究の予報概略.

計算者	予報極大時刻 (UT)	ダスト・トレイル放出年	予想ZHR	出典
Lyytinen	6時59分	1903	最も重要	1)
	7時15分	1909	最も重要	
	6時33分~7時49分	1818~1914		
Maslov	7時18分	1898~1919	200~300	2)
	7時55分	1763~1783	50~150	
Vaubailon	7時40分前後	1803~1924	100~400	3)

1) Jenniskens 2006, 2) Maslov 2010, 3) Vaubaillon 2012

*川崎市青少年科学館 (かわさき^{そら}宙と緑の科学館)
Kawasaki Municipal Science Museum

を増やすことが重要であると考え、これを本研究の第 1 の目的と設定した。また、出現後に実際の観測結果と比較し、予報の妥当性について考察を加えることを第 2 の目的とした。

2. 研究手法

2-1. 母天体の軌道要素

母天体の軌道要素について、1898 年の回帰以降のものは、木下一男氏によって計算されたものを使用した (Kinoshita, 2012)。それ以前の回帰時のものについては、木下氏による 1898 年の回帰時の軌道要素をもとに、当方が数値積分によりさかのぼって計算し、これを使用した。

2-2. ダスト・トレイルのシミュレーション計算

ダスト・トレイルのシミュレーション計算には、Asher (2000) により見出され、また Sato (2003) によって木星族短周期彗星に適用した手法を用いた。この方法は、最も単純なダスト・トレイルモデルの手法である。すなわち、母天体回帰の近日点通過時にダスト (流星体) を放出し、ダスト・トレイルの位置のシミュレーション計算を実施した。ダストの放出方向は、近日点における母天体の運動方向及びその反対方向とした。摂動計算には、8 惑星、冥王星、3 小惑星 (ケレス・パラス・ベスタ)、月の引力を考慮した。なお、太陽光圧の影響は考慮していない。また、母天体からのダストの放出時期は、1803 年～2009 年に設定した。さらに古い時期に放出されたダストの影響を受けることも考えられるが、母天体の軌道の不確定さが大きくなること、一般的に早い時期に出されたダスト・トレイルほどダスト密度が小さくなり、流星群出現への関与が小さくなっていくことの 2 点より、この範囲で妥当と判断した。

2-3. 出現規模の推測

ダスト・トレイルモデルによる出現規模による予測は、現在においてもまだ確立されていない状況である。筆者は、過去の出現における状況と比較することによって出現規模を予測する手法をこれまでとってきたが、きりん座流星群の場合は、2014 年が初めての出現となる流星群であり、この手法を適用することができない。そこで、ダスト・トレイルの分布が似た状況にある別の流星群を探索し、このケースと比較することで、出現規模を予測することとした。

3. 結果

3-1. 2014 年のダスト・トレイルの分布

ダスト・トレイルモデルによるシミュレーション計算を行った結果、1803 年～1909 年に母天体が回帰した際にダストが放出され、その後形成する 22 本のダスト・トレイルが、2014 年に地球と接近することが判明した。これらの各ダスト・トレイルの状況を表 3 にまとめた。また黄道面 (地球軌道面) におけるダスト・トレイルの分布

を図 1 に示した。

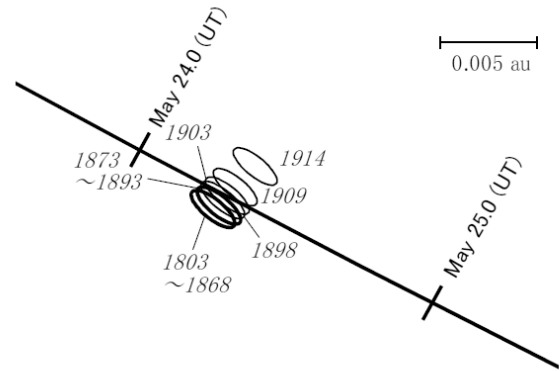


図 1. 2014 年に地球と接近するダスト・トレイル分布。

これらのダスト・トレイルは、地球と 0.001 au 以内に接近しており、流星群の出現に寄与する可能性が高いものである。ダストが彗星から放出した速度は、2m/s 以内であり、一般的には大きな粒のダストが多く、明るい流星が含まれることも想定される状況であった。接近時刻は、日本時の 5 月 24 日 6 時 35 分～7 時 25 分 (世界時) であり、この時間帯を中心に流星群の出現が期待される状況であることが判明した。先行研究 (表 1) と比較すると、1 時間程度の差があるが、およその傾向は一致した。なお日本国内においては、極大の時間帯が昼間にあたり、光学的な観測は困難な状況であった。

3-2 出現規模の推測

きりん座流星群は、これまでにまとまった出現記録がないため、過去の状況と比較して出現規模を推測することは不可能であった。そこで、今回のダスト・トレイル分布状況と似たケース、すなわち、母天体が木星族短周期彗星であり、多くのダスト・トレイルがまとまって地球と接近し、かつダストの放出速度が比較的小さい状況を探した。その結果、10 月りゅう座流星群 (October Draconids) における 1946 年のダスト・トレイルの分布が、比較的似ている状況にあることが判明した。10 月りゅう座流星群の母天体は、公転周期が約 6.5 年の木星族短周期彗星であるジャコビニ・チンナー彗星 (21P/Giacobini-Zinner) である。10 月りゅう座流星群の 1946 年に接近するダスト・トレイルについて、筆者が計算した状況を表 4 にまとめる。この結果から、1946 年の 10 月りゅう座流星群の出現には、1900 年～1940 年に母天体から放出されたダストが形成するダスト・トレイルが関与したと推測される。これらは、地球と 0.0012 au 以内の距離に接近しており、その接近時刻は、1946 年 10 月 10 日 3 時 45 分～4 時 2 分 (世界時) に集中している。当時の出現状況は、大流星嵐と表現されるような状況で、ZHR は、90,000～15,000 に達したと考えられている (Jenniskens, 1995)。これを今回の出現規模推測の基準として考えることにした。

表 3. きりん座流星群の 2014 年におけるダスト・トレイルの状況.

放出年	極大予報時刻		太陽黄経 (2000.0)	接近距離 (au)	放出 速度 (m/s)	fM	放射点位置		Vg (km/s)
	月日 (UT)	時刻 (UT)					赤経 (°)	赤緯 (°)	
1803	2014/05/24.28	06:36	62.833	+0.00099	+0.11	0.015	122.66	+79.19	16.18
1808	2014/05/24.27	06:35	62.832	+0.0010	+0.09	0.012	122.66	+79.19	16.18
1813	2014/05/24.27	06:35	62.832	+0.0010	+0.08	0.012	122.65	+79.19	16.18
1818	2014/05/24.27	06:35	62.832	+0.0010	+0.08	0.011	122.65	+79.19	16.18
1823	2014/05/24.27	06:35	62.832	+0.0010	+0.08	0.011	122.65	+79.19	16.18
1828	2014/05/24.28	06:36	62.832	+0.0010	+0.09	0.012	122.65	+79.19	16.18
1833	2014/05/24.28	06:36	62.833	+0.0010	+0.10	0.014	122.65	+79.19	16.18
1838	2014/05/24.28	06:36	62.833	+0.00099	+0.11	0.016	122.65	+79.19	16.19
1843	2014/05/24.28	06:36	62.833	+0.00097	+0.13	0.019	122.65	+79.19	16.19
1848	2014/05/24.28	06:37	62.833	+0.00097	+0.14	0.020	122.65	+79.19	16.19
1853	2014/05/24.28	06:38	62.834	+0.00096	+0.15	0.021	122.65	+79.19	16.19
1858	2014/05/24.28	06:39	62.835	+0.00095	+0.16	0.022	122.65	+79.19	16.19
1863	2014/05/24.28	06:40	62.835	+0.00093	+0.18	0.025	122.65	+79.19	16.19
1868	2014/05/24.28	06:41	62.836	+0.00090	+0.21	0.030	122.66	+79.19	16.19
1873	2014/05/24.28	06:44	62.838	+0.00086	+0.26	0.035	122.66	+79.19	16.19
1878	2014/05/24.28	06:47	62.840	+0.00080	+0.35	0.046	122.67	+79.18	16.19
1883	2014/05/24.29	06:51	62.843	+0.00068	+0.50	0.067	122.70	+79.18	16.19
1888	2014/05/24.29	06:54	62.845	+0.00058	+0.57	0.070	122.72	+79.17	16.19
1893	2014/05/24.29	06:57	62.847	+0.00044	+0.67	0.082	122.74	+79.17	16.20
1898	2014/05/24.29	07:03	62.851	+0.00025	+0.81	0.097	122.78	+79.16	16.20
1903	2014/05/24.30	07:10	62.856	-0.00045	+1.04	0.12	122.83	+79.14	16.20
1909	2014/05/24.31	07:25	62.866	-0.00061	+1.51	0.15	122.93	+79.11	16.21

出現規模に最も関与するのは、ダスト・トレイルのダストの密度 (濃度) である。個々の流星群において、ダストの密度の指標となる値に「fM 値」がある。これは、ダスト・トレイルの引き伸ばされた程度を表す数値である。ダスト・トレイルは、一般的に公転回数 (回帰数) が多くなるにつれて、引き伸ばされて密度が小さくなっていく。一方で、各惑星から受ける摂動によって、個々に進化し、その密度が変化していく。fM 値は、摂動を受けないと仮定した際の 1 回帰目 (1 公転目) のダスト密度に対する実際のダスト・トレイルの密度の比で表される。本研究では、式 1 によって求めた。

$$fM = \Delta t_0 / \Delta t \quad \text{—— 式 1}$$

ただし、 Δt は、ダスト・トレイルの当該微小区間が黄道面を横断する時間で、 Δt_0 は、同一微小区間が摂動を受けなかったと仮定した際に一回帰目に黄道面を横断する時間である。摂動を受けない理想的な状況を仮定した場合には、n 回帰目のダスト・トレイルの fM 値は、n 分の 1 となって、その密度が減少していくことになる。

まず、比較の基準となる 1946 年の 10 月りゅう座流星群について fM 値を検討した。この年に地球に接近する

ダスト・トレイルは、1900 年～1940 年に放出した 7 本である。本来ならば個々の極大時刻と、極大継続時間を考慮しなければならないが、極大時刻の差の最大が 17 分間に集中しているため、単純に fM 値を加算することでダスト・トレイル全体の密度を求めた。この値は、2.67 となった。

次にきりん座流星群についても検討した。本研究から求められたきりん座流星群のダスト・トレイルは、22 本が 2014 年 5 月 24 日 7 時前後の 1 時間以内に接近する。接近時刻の差は、若干大きい、想定される継続時間が不明であるため、今回についてはやはり fM 値を単純に加算して密度を求めることにした。その値は、0.91 と求めた。したがって、fM 値によるダストの濃度を比較すると、2014 年のきりん座流星群は、1946 年の 10 月りゅう座流星群に対して、約 3 分の 1 (34.0%) との結果となった。

続いて、母天体の活動度についての検討を行った。同じ流星群の場合には、母天体の彗星活動や軌道が大きく変化しない限り、ほぼ同じ程度にダストが放出されるため、fM 値だけの比較による推測で、ある程度の流星活動規模の予測をすることが可能である。しかし、今回のように母天体の違う流星群を比較する場合には、それぞれ

表 4. 10 月りゅう座流星群の 1946 年におけるダスト・トレイルの状況.

放出年	極大予報時刻		太陽黄経 (2000.0)	接近距離 (au)	放出 速度 (m/s)	fM	放射点位置		Vg (km/s)
	月日 (UT)	時刻 (UT)					赤経 (°)	赤緯 (°)	
1900	1946/10/10.17	04:02	197.003	-0.000054	+2.76	0.17	262.27	+53.95	20.45
1907	1946/10/10.17	03:58	197.001	+0.000047	+3.14	0.21	262.25	+53.96	20.45
1913	1946/10/10.16	03:50	196.995	+0.00064	+3.31	0.22	262.22	+53.99	20.44
1920	1946/10/10.16	03:46	196.992	+0.00088	+3.83	0.26	262.22	+54.00	20.44
1926	1946/10/10.16	03:45	196.992	+0.0010	+4.86	0.33	262.21	+54.00	20.44
1933	1946/10/10.16	03:45	196.992	+0.0011	+7.15	0.51	262.22	+54.00	20.44
1940	1946/10/10.16	03:46	196.992	+0.0012	+13.86	0.96	262.22	+53.99	20.44

の母天体の活動度の差が大きく影響すると考えられるからである。今回、彗星の活動度を示す値として標準等級を利用することにした。これは、彗星太陽間距離および彗星地球間距離がともに1 auの位置にあると仮定した場合の等級で示され、実際の観測から求められる。JPL Small-Body Database Browserによれば、リニア彗星(209P)の標準等級は16.4等、ジャコビニ・チンナー彗星(21P)の標準等級は10.5等である(JPL, 2014)。なお、彗星の過去の活動度については若干の変化が考えられるが、今回はともに同程度の活動度が継続していたとみなして検討することにした。標準等級では、きりん座流星群の母天体の方が、10月りゅう座流星群の母天体よりも5.9等暗い。星の等級は、ログスケールを使用しており、光度が100倍違う場合に5等級の差となって表されるように求められる。したがって、5.9等の等級差は、230倍の光度差に相当する。これに彗星活動が比例すると考えられるため、他の条件が同等の場合、きりん座流星群の出現規模は、10月りゅう座流星群の230分の1程度と計算されることになった。

これらより、fM値からの条件と、母天体の活動度による条件を合わせた場合、2014年のきりん座流星群の出現規模は、1946年の10月りゅう座流星群の670分の1程度の出現規模が予測されることとなった。1946年の10月りゅう座流星群は、ZHRで9,000~15,000であったため、2014年のきりん座流星群は、ZHRで13~22程度の出現規模であると予測される結果が求められた。これは、先行研究に対して、およそ10分の1、あるいはそれ以下の出現規模の予測値となった。

これら一連の予報情報については、商用雑誌である「星ナビ誌」に掲載し、国内に広く伝えた(佐藤, 2014)。

4. 考察

4-1. 観測結果と極大時刻

極大日の2014年5月24日には、極大時刻における観測条件のよいアメリカ大陸を中心に、きりん座流星群の出現が観測された。また、アマチュア無線の電波帯を利用した電波観測においても、きりん座流星群と思われる極大が観測された。IMO (International Meteor Organization; 国際流星機構)による眼視観測の集計結果(IMO, 2014)と、杉本弘文氏による電波観測の結果(杉本2014)を図2に示す。眼視観測の結果では、5月24日6時42分(世界時)にZHR = 19の極大が観測され、一度減少した後に8時21分(世界時)に2回目の極大としてZHR = 20が観測されている。それぞれの極大時における観測者数は、それぞれ7名、3名と少なく、誤差についても前者が±5、後者が±7と観測値に対して大きくなっている。極大後は、好条件の地域が太平洋に移ったため、観測がなく、減少していく様子は捉えられていない(IMO, 2014)。太平洋地域では、国立天文台ハワイ観測所において東京大学が主体として運用する全天カメラにきりん座流星群と思われる流星が記録されたが、その数は非常に少なかった(Sato *et al.*, 2014)。これらを考慮すると、2つの極大が観測されたというよりは、6~8時台においてゆるやかな極大が観測されたと考える方が妥当かもしれない。いずれにしても、これらの時間帯は、本研究及び先行研究の極大予報の時間帯にあたり、母天体からのダスト・トレイルによってきりん座流星群が出現したことは確実である。個々のダスト・トレイルが寄与した影響を判断するには観測数が少ないが、本研究の予報と比較すると、1つ目の極大は、1803年~1878年のダスト・トレイルの接近の頃に該当する。一方で2つ目の極大に該当するようなダスト・トレイルの接近は、本研究には見出されなかった。

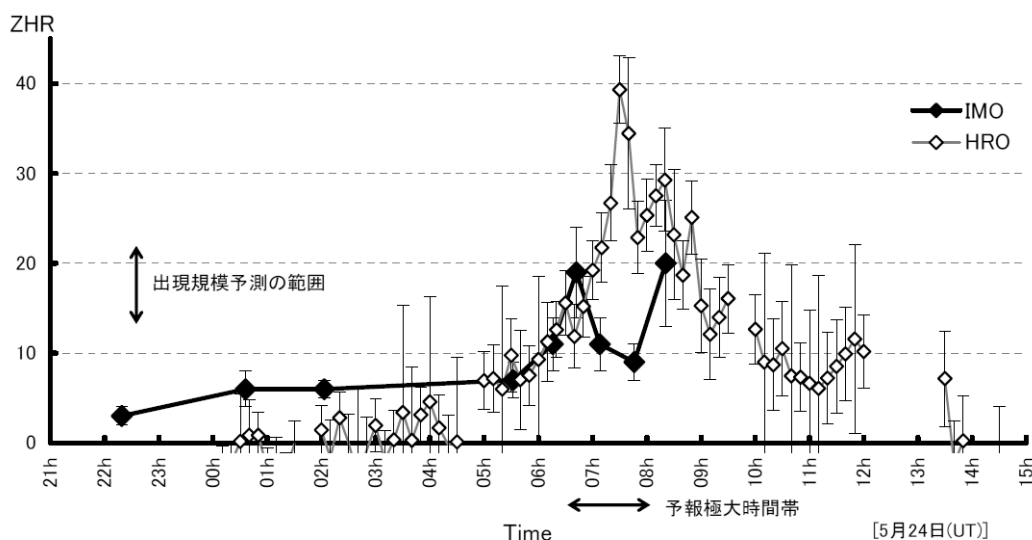


図2. きりん座流星群の観測結果.

IMO: IMO, 2014; HRO: Sugimoto, 2014.

電波観測においては、極大時刻が日中であった日本でも観測可能であり、国内 10 地点、海外 26 地点の観測がまとめられた。集計結果によると、7 時 30 分 (世界時) に眼視観測よりも若干出現規模が大きい ZHR = 39.3 の極大が観測された (杉本, 2014)。電波観測では、眼視観測よりも暗い流星まで捉えることができるため、暗い流星の多い極大を捉えた可能性がある。本研究の予報と比較すると、1909 年放出のダスト・トレイルの接近時刻に近く、このダスト・トレイルが関与した可能性が考えられた。

4-2. 出現規模の検討

流星群の出現規模は、前述の通り、眼視観測において ZHR = 20 程度にとどまった (IMO, 2014)。これは、本研究から得られた予報値である ZHR = 13~22 に近い結果と言える。電波観測では、ZHR = 40 程度の出現が捉えられたが、これも本研究の予報に対して約 2 倍の差にとどまった。これは、ZHR の予報値が 100 を超えていた先行研究より、精度の良いものであったと言える。この結果から、母天体が異なる別の流星群の過去の出現を基準とした場合にも、ダスト・トレイルの分布やそれを形成するダストの放出条件が似た状況下にある場合には、出現規模を予測しうるものと考えられた。

一方で、今回の検討要素には含まれない別の要素が、出現規模に影響する可能性もある。例えば、ダスト・トレイルと地球の接近距離や、ダストが放出されたときの速度の違いである。このような要素も含めてさらに検討し、モデル計算と実際の観測結果を比較できるような経験値を積み重ねていく必要があると思われた。

5. 結論

近年、各研究者が進めてきたダスト・トレイルモデルによるシミュレーション計算により、流星群の極大時刻においては、精度の良い予測ができるようになってきた。今回のきりん座流星群の出現についても、先行研究及び本研究において、ある程度はこの精度を確認することができたと考えられる。

一方で、出現規模についての予測手法は確立しておらず、まだ課題が多い。今回筆者は、条件の良く似た別の流星群を基準に、きりん座流星群の出現規模の予測を試みた。実際の観測結果と比較して検討したところ、先行研究よりも精度の良い予測をすることができたと考えら

れた。しかしながら、より普遍的に精度の良い出現予測を行うためには、今回の手法をさらに改良し、さらに経験値を積んでいくことが必要となる。

6. 参考文献

- Asher, D. J., 2000. In: *Proc. Int. Meteor Conf., Frasso Sabino, Italy, pp. 23-26 September 1999, ed. R. Arlt (Mechelen, Belgium: International Meteor Organization)*, p. 5.
- Jenniskens, P., 1995. *A & A (Astron. Astrophys)*, **295**(1): 206.
- Jenniskens, P., 2006. *Meteor Showers and their Parent Comets*, p. 352.
- Sato, M., 2003. *WGN (J. Int. Meteor Org.)*, **31**: 59.
- 佐藤幹哉, 2014. 月刊星ナビ, 2014 年 6 月号.
- 佐藤幹哉, et al., 2014. 日本天文学会 2014 年秋季大会講演予稿集, p.118.
- Online Available from Internet
- Maslov, M., 2010. 209p-ids 1901-2100 : activity predictions. <http://feraj.narod.ru/Radiants/Predictions/1901-2100eng/209p-ids1901-2100predeng.html> (accessed on 2014-04-06)
- Vaubailon, J., 2012. The next big meteor shower. http://www.imcce.fr/langues/en/ephemerides/phenomenes/meteor/DATABASE/209_LINEAR/2014/index.php (accessed on 2014-04-06)
- Kinoshita, K., 2012. 209P/LINEAR. <http://jcometobs.web.fc2.com/pcmtn/0209p.htm> (accessed on 2012-10-09)
- JPL, 2014. JPL Small-Body Database Browser. <http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi> (accessed on 2014-04-09)
- ICQ, 2014. ICQ/CBAT/MPC: Recent Comet Magnitudes. <http://www.icq.eps.harvard.edu/CometMags.html> (accessed on 2015-12-25)
- IMO, 2014. Camelopardalids 2014: visual data quicklook. <http://www.imo.net/live/camelopardalids2014/> (accessed on 2014-09-10)
- 杉本弘文, 2014. HRO きりん座流星群速報. <http://www5f.biglobe.ne.jp/~hro/Flash/2014/CAM/index.htm> (accessed on 2014-06-10)

