

先端的な流星観測による彗星のダスト放出と進化の研究

藤原 康德

博士（理学）

総合研究大学院大学

複合科学研究科

極域科学専攻

平成30（2018）年度

先端的な流星観測による彗星のダスト放出と  
進化の研究

藤原 康德  
博士（理学）

総合研究大学院大学  
複合科学研究科  
極域科学専攻

平成 30 年度  
(2018)

## 要旨

本研究は、太陽系小天体の進化を流星群の観測から明らかにしようという研究である。太陽系小天体とは、小惑星、彗星、太陽系外縁天体、惑星間空間塵などを指す。彗星から放出された惑星間空間塵でミリメートル以上の大きさの流星体は、次第に彗星の前後に伸びる流星体の流れ、ダストトレイルを形成する。この流れと地球とが衝突したときに地上で見られるのが流星群である。

1990年代後半に登場したダストトレイル理論は、彗星起源の流星体の流れが地球に衝突することによる流星群出現についての理解を飛躍的に改善した。流星体の流れは、親彗星から近日点回帰ごとに放出された個別のダストトレイルの集合体であり、親彗星の回帰ごとに形成される個々のダストトレイルの進化が流星体の流れ全体の進化・変遷につながることをこの理論は明らかにした。またこの理論により過去の流星群の大出現の検証及び将来の正確な出現予報が可能となった。2001年と2002年のしし座流星群では、この理論による予報は、観測結果と非常に良い一致を見た。群流星は親天体の破片であることから、流星群の観測は親天体の変化を反映するため、親天体の変遷を理解する手法として重要である。

小惑星と彗星は一般的には太陽に接近したときの形状が異なるものの、近年の観測・研究から、小惑星の中には、彗星とよく似た細長い楕円軌道を持つものが多数発見されており、かつて彗星であった天体が揮発物質を失ったものである可能性が指摘されている。小惑星と彗星の定義・線引きは曖昧になってきており、彗星から小惑星への進化・変遷など太陽系小天体間の関係については、未解明の課題が多数存在する。本研究では、ダストトレイル理論と流星群の観測とを組み合わせることで比較検討を加えることにより、親彗星からの流星群の形成とその進化を研究するとともに、ダストトレイルによる流星群の予報と観測結果から親彗星の過去の活動履歴を調べるといった新たな手法を用いて、これまで明らかでなかった彗星から小惑星への変遷にかかる課題の解明にも取り組んだ。

具体的には、第2章では、親彗星から大きな速度で放出された流星体から成るダストトレイルによる流星群の出現予報を観測から検証するとともに、ダストトレイル理論の予想と観測とを比較することにより親彗星からの放出速度の速い流星群の特性を明らかにする研究を行った。この研究では、2002年11月のしし座流星群と2012年10月の10月りゅう座流星群の二つの流星群の観測を実施して検討を行った。一つ目の課題として、しし座流星群で親天体から高速度で放出された流星体からなるダストトレイルによる流星群の出現についての観測・研究を行った。しし座流星群の過去の大出現をダストトレイル理論で検証した結果、そのほとんどのケースで流星体の親天体からの放出速度は $15\text{m s}^{-1}$ 以内であったが、1965年に親天体から約 $89\text{m s}^{-1}$ という速い速度で放出された流星体からなるダストトレイルが1回帰後の2002年に地球に接近するすることが予報されたため、このダストトレイルによる流星群が起こるかどうかが、また、起きればどのような特性があるのか、特に光度分布について明らかにするために高感度ビデオカメラによる観測を実施した。結果、このダストトレイルによると考えられる6~8等の暗い流星を主とする活発な流星群活動を捉えた。こ

これは肉眼では見えない暗い流星が主体となる流星群の大出現を捉えた世界最初のケースとなった。また、このような高速で放出された流星体についてその放出速度に対応する光度分布が明らかにした。

2 つめの課題は、2012 年の 10 月りゅう座流星群の MU レーダーによる流星ヘッドエコー観測とその結果の考察である。2012 年のダストトレイル理論による予報と観測結果の比較とともに、2011 年のダストトレイル予報と MU レーダー観測結果の検討結果を組み合わせることで、2012 年と 2011 年のりゅう座流星群の活動を違いについて考察した。MU レーダーによる群流星のレーダー散乱断面積の分布の観測結果の比較から 2012 年は 2011 年より質量の小さい流星体の割合が多かったことを解明した。2011 年の出現をもたらしたダストトレイルは親天体からの流星体の放出速度が約  $8\text{m s}^{-1}$  であったのに対して 2012 年は  $43\sim 51\text{m s}^{-1}$  と速かったことが観測された質量分布の差異の原因であると考えられる。親天体からの放出速度の大きさが観測された流星体の質量分布を決定したという点で、この観測結果は 2002 年のしし座流星群の出現と特性を裏付けるものとなった。観測される流星（流星体）と親天体からの放出速度と流星の光度（質量）の分布との関連の研究は、流星群の誕生と構造のメカニズムを明らかにするとともに親天体の流星体放出時の活動状況を知る上でも重要であることを示した。

第 3 章では、彗星の物理的な進化を流星群の出現から推測するという近年新たに考案された手法を 289P/Blanpain 彗星とほうおう座流星群のケースに適用した。Blanpain 彗星は、1819 年に最初に観測されて以来、観測で検出されることがなかったが、2003 年に偶然に小惑星として検出されたもので、このことで Blanpain 彗星の軌道が正確に確定され、ダストトレイル理論によって 20 世紀初頭にこの天体から放出された流星体により 2014 年 12 月にほうおう座流星群が観測されることが予報された。この流星群の活動が確認されるか、またその規模はどれくらいかを観測することにより、1819 年に彗星として観測されて以来見失われていたこの天体が、20 世紀初頭にすでに枯渇彗星となっていたのか、あるいは彗星として活動をしていたのか、またその活動度についても推測することが可能であると指摘されていた。この点に注目し、アメリカ東海岸に遠征して流星群の観測を実施し、その結果から 1956 年の大出現の観測の 1/10 以下程度の弱い流星群活動を検出した。このことからほうおう座流星群の親天体の Blanpain 彗星は、20 世紀初頭には弱いながらも彗星活動を行っていたことを解明した。本研究は、新たに提案された手法を用いて彗星の活動履歴を推定した初めてのケースである。

第 4 章では 2012 年度に第 53 次南極地域観測隊での公開利用研究として実施した南極昭和基地で行った南天で活動する流星群のビデオ観測結果についてまとめた。流星群の観測はこれまで主として北半球で行われてきたので、南天での流星群の観測は不十分であった。南天で活動する流星群の観測、特に新流星群を見出すことは、2,3 章で行ったような研究のための基本的なデータを得るという意味で重要である。今回の観測は、1 シーズンのみの観測であったが、観測データが得られた 234 夜中 114 夜 (49%) で流星が検出された。流

星群の検出法は、眼視観測で用いられている方法を南極でのビデオ観測でより多くの流星輻射点を検出できるように最適化した。その結果、32 個の輻射点を検出した。検出された輻射点の内、17 個は 4 つの確定流星群、3 個は 3 つの未確定流星群の輻射点と同定され、検出法の有用性を示すことができた。今回検出した 9 つの未報告の輻射点については今後の観測・研究への足掛かりとなると考える。

第 5 章では以上の研究のまとめとこれを踏まえた将来計画について記した。以上、本研究では彗星からのダスト放出とその進化、特に流星群の形成と彗星の物理的進化についてダストトレイル理論と高感度ビデオ観測や MU レーダーでの最先端の流星観測の結果から明らかにし、特に南半球の群流星の観測に新たな一石を投じた。

## 目次

1. 序章-----	1
1-1 流星・流星群研究の歴史的経過-----	9
1-2 流星の観測法-----	9
1-3 流星群の軌道-----	10
1-4 流星群の形成と進化-----	13
1-5 流星群の出現予報-----	13
1-6 この研究の目的-----	19
2. ダストトレイル理論の検証と観測された流星群の特性－親天体から高速で放出された流星体の場合-----	21
2-1 2002年のしし座流星群の1回帰ダストトレイルの活動-----	21
2-1-1 観測-----	22
2-1-2 解析-----	23
2-1-2-1 同時流星-----	23
2-1-2-2 活動の時間変化-----	23
2-1-2-3 フラックス-----	28
2-1-2-4 光度分布-----	28
2-1-3 議論とサマリー-----	31
2-2 2012年の10月りゅう座流星群のMUレーダーヘッドエコー観測-----	32
2-2-1 序論-----	32
2-2-2 流星のヘッドエコー-----	33
2-2-3 MUレーダーによるヘッドエコー観測-----	34
2-2-4 観測結果-----	36
2-2-4-1 りゅう座流星群の活動度-----	37
2-2-4-2 りゅう座流星群の輻射点と軌道-----	44
2-2-4-3 レーダー散乱断面積-----	47
2-2-5 議論とサマリー-----	50
3. 流星群の活動から推定する親天体の過去の活動履歴-----	52
3-1 序論-----	52
3-2 観測-----	53
3-2-1 遠征 (Expedition) -----	53
3-2-2 観測機材-----	55
3-2-3 観測-----	57
3-2-4 解析-----	57
3-2-5 群流星の判定-----	58

3-3 観測結果-----	59
3-3-1 活動の時間変化-----	59
3-3-2 光度分布-----	63
3-3-3 輻射点-----	63
3-4 議論-----	64
3-5 結論-----	67
<b>4. 南極昭和基地で行った南天で活動する流星群のビデオ観測-----</b>	<b>68</b>
4-1 序論-----	68
4-2 観測機材と観測-----	69
4-2-1 観測機材-----	69
4-2-2 観測-----	69
4-2-3 データ解析-----	73
4-2-4 流星輻射点の検出法-----	73
4-3 観測結果-----	76
4-3-1 検出された輻射点-----	76
4-3-2 確定群-----	76
4-3-3 未確定群-----	80
4-3-4 新たに検出した輻射点-----	80
4-4 議論-----	81
4-4-1 確定群-----	81
4-4-2 未確定群-----	81
4-4-3 新たに検出した輻射点-----	82
4-5 まとめと将来プラン-----	84
<b>5. 結論-----</b>	<b>90</b>
<b>謝辞-----</b>	<b>92</b>
<b>引用文献-----</b>	<b>94</b>

## 1. 序章

太陽系は、太陽と太陽をとりまく八つの惑星、五つの準惑星、惑星と準惑星の周囲を公転する衛星、および太陽系小天体と呼ばれる天体で構成されている（図 1-1）。太陽系小天体には、小惑星、彗星、太陽系外縁天体、惑星間空間塵が含まれる。彗星と小惑星とは、共に太陽の周囲を公転する惑星にまで成長できなかつた小天体であり、彗星は氷をはじめとする揮発性物質を含む小天体で、小惑星は主に岩石からなる小天体だと考えられており、天文学的には、その天体を観測したときに、質量放出の兆候があるものを彗星、それが確認されずに恒星状になっているものを小惑星と定義している（渡部 2008）。海王星の軌道の外側を周回している氷が主成分であると考えられている天体は太陽系外縁天体と呼ばれている。太陽系空間には、かなり小さい個体微粒子（塵）が存在していて惑星間空間塵と呼ばれている。小惑星と惑星間空間塵とのサイズの境界は直径 1 m であるが、明確に決められない。惑星間空間塵の多くは 1mm よりも小さく、サイズが小さいものほど数が多くなる。彗星と小惑星が惑星間空間塵の供給源だと考えられている（渡部 2008）。

彗星は、太陽に近づくと、その熱で揮発性物質が蒸発し、質量放出をする。このときに放出された塵（惑星間空間塵）の中で太陽からの光の圧力を大きく受けない主としてミリメートル以上の塵粒が地球と衝突して流星群となって観測される（本研究の主観測対象であり、1-4 以下で詳述する）。彗星の多くはその軌道が細長い楕円軌道であるのに対して小惑星の大半は、火星と木星の間で円に近い楕円軌道を巡っている（小惑星帯、メインベルト小惑星）。しかしながら、小惑星の中には、彗星のような軌道をもつものが多数見つかっており、これらの中には、彗星のように流星群を伴っているものもある。彗星のような軌道の小惑星は、かつて彗星であった天体が物理的進化により揮発物質を放出しきって非揮発性物質だけが残されたいわゆる枯渇彗星である可能性が指摘されている（Weissman et al. 2002）。さらには、小惑星帯の中であって、明らかに小惑星と同じような軌道にあるのに、塵を放出（彗星活動）している天体も見つまっている（メインベルト彗星と呼ばれている）。太陽系小天体は組成からは小惑星と彗星とに明確に区分できるものではなく、数は少ないながらも連続的に分布している可能性が強くなってきている（渡部・渡部 2016）。このように彗星、小惑星、流星とは密接に結びつきあっており、これらの太陽系小天体の起源と進化、またその相互関係を明らかにすることには太陽系の構造と進化を研究する上で大きな意味がある。また、太陽系小天体の中には、地球軌道と交差する軌道をもつものがある。これらは地球と衝突することにより地球環境に直接甚大あるいは壊滅的な影響を及ぼすので、太陽系小天体の空間的構造とその進化を研究することは我々人類の将来を知る上でも重要である。

流星（meteor）は、典型的には mm から cm サイズの小さな塵粒が地球大気に高速で太陽系空間から突入することで生ずる発光現象とそれに関連する物理現象のことである。この塵粒を流星体（meteoroid）という。流星体が高速で地球大気と衝突することにより衝撃波加熱され蒸発したプラズマが発光しており、また、こうしてできたプラズマ中の自由電子が電波を散乱する。したがって流星は光学的に、あるいは電波によって地上から観測するこ



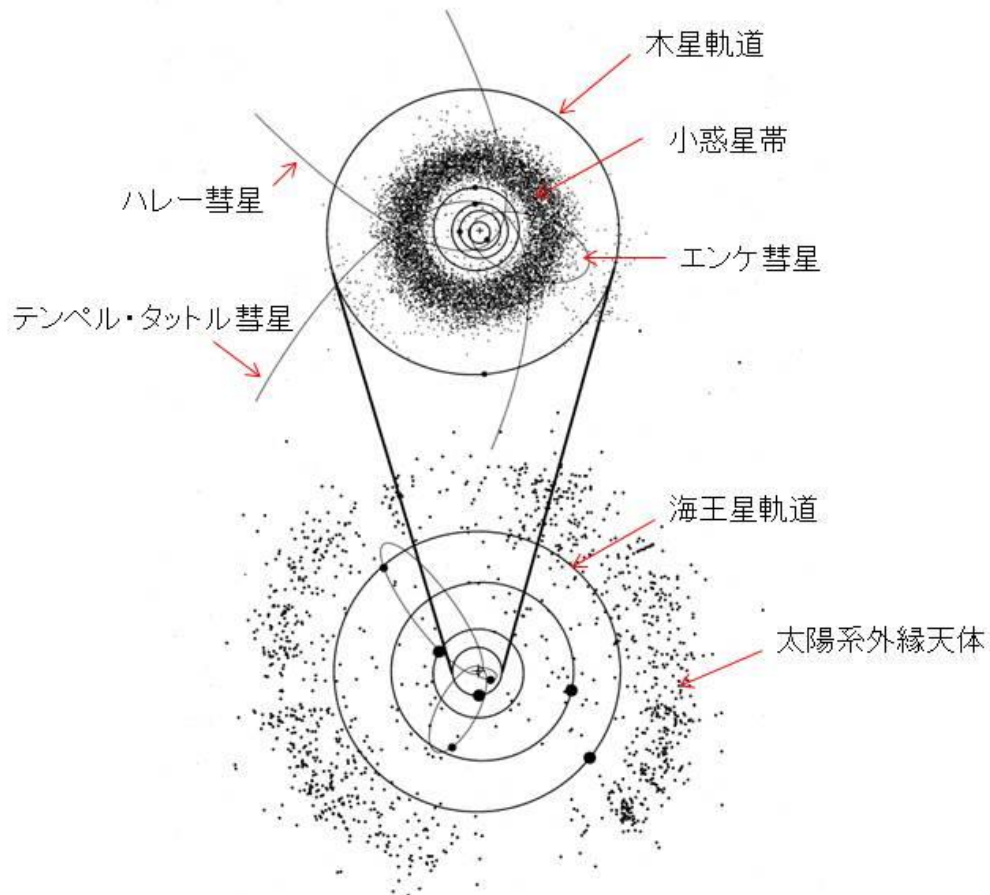


図 1.1 太陽系の概観図. 上が木星までの軌道図で、木星と火星の間に無数の小惑星が存在している。下は、その外側の軌道図で海王星の軌道の外側には太陽系外縁天体が分布しているのがわかる。薄く書いた楕円形の三つの軌道は、彗星の典型例としてハレー彗星 (左上)、エンケ彗星 (右下)、テンペル・タットル彗星 (左下) を示す。銀河面の方向であるため、5-6 時の方向に外縁天体が少ない。

図1-1 太陽系の概観図 渡部(2008)による

とができる。Hughes (1978) による流星体のサイズと光度のおおよその関係と、それぞれの観測法により観測できる範囲(限界)を表 1-1 に示した。質量が  $10^{-6}$ g より小さい塵粒は、大気との衝突で生ずる熱を塵粒が吸収する量が不十分で、その塵粒の温度を融点まであげることができないので、流星として観測できない (Hughes 1978)。国際天文学連合 (International Astronomical Union: 以下 IAU) の流星研究部門の分科会である F1 委員会 (Commission F1 Meteors, Meteorites and Interplanetary Dust) では、流星体の定義として、惑星間空間 (interplanetary space) から突入してきた大きさ (size) およそ  $30\ \mu\text{m}$  から  $1\ \text{m}$  の間の天然の固体物質という定義を採択した (2017 年 4 月 30 日付)<sup>1</sup>。最大の大きさ  $1\ \text{m}$  という境界は物理的な意味をもつものではなく合意 (agreement) として設定されたという注がついており、便宜的な境界と考えられる。さらに別の注として、流星観測という面からは、流星 (現象) を引き起こす物体は、大きさ (size) にかかわらず流星体ということも規定されている。

流星の発光する高度は、地上  $80\text{km}$  から  $120\text{km}$  程度である。なお、発光する高度は個々の流星の速度、質量等に依存し、流星体の突入速度が大きいほど、発光高度は高くなる傾向にある (Jacchia et al. 1967; Molau & SonotaCo 2008)。しし座流星群の-4 等以上の非常に明るい流星では、地上高度  $160\text{km}$  以上で光り始める流星が著者らにより見出されている (Fujiwara et al. 1998; Spurný et al. 2000)。流星の発光スペクトルでは輝線が顕著であり、主としてナトリウム、鉄、マグネシウム、カルシウム、ケイ素、あるいは地球の大気が起源の酸素、窒素等の輝線が観測される (図 1-2) (Ceplecha et al. 1998)。

1 年の中で特定の日時に流星の数が急増するときがある。このときの流星は、天球上のある 1 点から放射状に流れているように見える。これは、これらの流星の流星体の集団が、ある一定の方向から平行に運動して地球大気に衝突するために、一種の遠近法により起こる。これを「流星雨」あるいは「流星群」(meteor shower) と呼び、この天球上の点を輻射点 (radiant point) という (図 1-3)。このような流星雨を起こした流星体が、ほぼ同一の空間運動を持ちながら群れをなしているものを流星群 (meteoroid stream) という。この流星雨と流星群という用語は、日本語ではしばしば混同して使われており、この論文でも特に注意を要するときは流星群 (shower) あるいは流星群 (stream) として区別をする以外は「流星群」という用語を使う。流星群に属する流星を群流星という。

流星群は、輻射点の近くにある恒星名をもとに XX 座 XX 流星群と呼ばれている (例: みずがめ座  $\delta$  流星群)。2009 年の IAU の総会で流星群のリストが整理され、名称のつけ方についても規則が定められた (Jenniskens 2008)。これを受けて IAU が決定した流星群につ

---

1

[https://www.iau.org/static/science/scientific\\_bodies/commissions/f1/meteordefinitions\\_approved.pdf](https://www.iau.org/static/science/scientific_bodies/commissions/f1/meteordefinitions_approved.pdf)

表1-1 流星(体)の大きさ・質量と明るさ(光度)と観測技術

質量 (g)	$10^{-8}$	$10^{-6}$	$10^{-4}$	$10^{-2}$	1	$10^2$	$10^4$	$10^6$
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	約 3.5 ←←←		約 0.8	→→→ 約 0.3				
直径	18 μm	82 μm	620 μm	46mm	2.2 cm	10cm	46cm	220cm
明るさ(等級)			10	5	0	-5	-10	-15
観測法				← 流星レーダー		← 35ミリ判カメラ	← 肉眼	← スーパー・シュミット・カメラ
				← 望遠鏡		← テレビカメラ		

斎藤馨児 流星 I (1984)の図1-1 出典はHughes(1978)  
 表中の直径で、46mmは0.46cm(4.6mm)の誤り

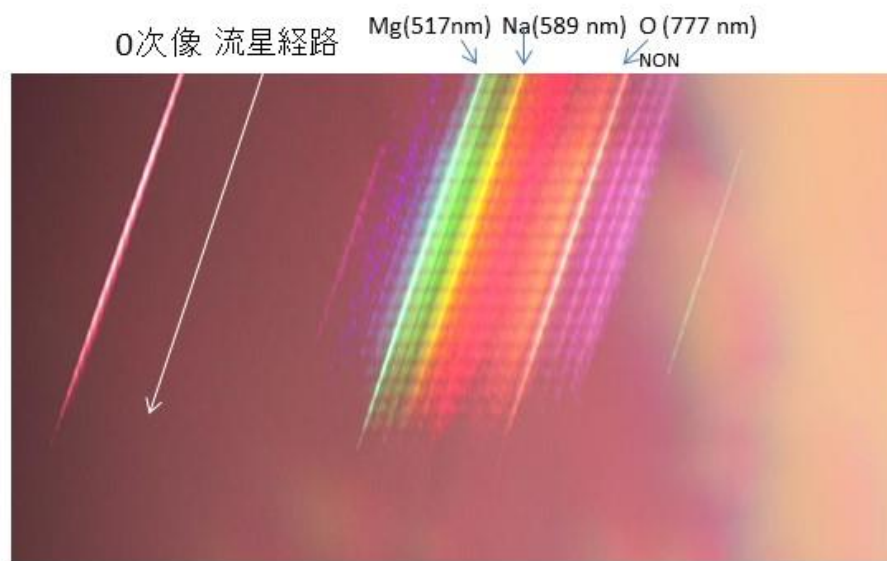


図1-2 流星のスペクトル画像 2015年12月19日 00時25分00秒(JST)  
12月いっかくじゅう座流星群流星  
撮影: SONY α7s (IRフィルター除去済) レンズ: 焦点距離50mm F1.4  
VISグレーティング300本/mm、フルハイビジョン動画(60P)からのピークホールド画像



図1-3 2001年11月19日に出現したしし座流星群. 多数の流星がしし座にある輻射点から放射状に流れているのが分かる。  
露出時間8分58秒×10コマ合成 15mm F2.8  
撮影:吉川明男氏

いては、国立天文台が和名（日本語表記）のルール<sup>2</sup>を設定した。流星群のリストは、IAU 流星データセンター（IAU Meteor Data Center: 以下、MDC と表記）で管理されており（Jopek & Kaňuchová 2017）、観測から存在が確認されている流星群は確定群（established meteor showers）としてリストアップされている。2018年2月26日制定の最新のリストでは、112個の流星群が確定群として掲載されている。確定群以外の流星群は、ワーキングリスト（working list of meteor shower）に掲載され、2018年2月26日のリストでは、819個掲載されている。これらの他に仮登録の流星群が130個ある。新たな流星群を発見した者は、発見報告論文が出版される前にMDCに報告して流星群の名称、略号、番号をMDCから取得することが推奨されている。ワーキングリストの流星群は、確認の観測等が積み重なり存在が確認された場合にはIAU F1委員会に設置されている流星群命名ワーキンググループ（Working Group on Meteor Shower Nomenclature）での議論を経てIAU総会時にF1委員会で確定群として認められる（Jopek & Kaňuchová 2017）。

確定流星群のうち主たる流星群の出現時期、輻射点位置などを表1-2に示す。流星群の活動の極大時における肉眼で見れる流星数は、最微星等級6.5等、雲量0という理想的な観測条件のもとで、流星群の輻射点为天頂にあると仮定したときの1時間当たりの数で示されている。これを天頂1時間流星数（zenithal hourly rate 以下ZHR）と呼ぶ（Jenniskens 1994）。ZHRは、1時間当たりの流星数（hourly rate 以下HR）に $r^{6.5-Lm}(1-f/10)^{-1} \sin h^{-\gamma}$ をかけることにより得られる。ここで $Lm$ は最微等の光度（等級）、 $f$ は雲量で、観測視野に占める雲の割合を0から10の11段階で示したものを示している。 $r$ は光度比で、流星の光度が1等級暗くなると流星数が $r$ 倍になるということを示している。 $h$ は輻射点の仰角であり、 $\gamma$ は流星が有限の経路長を持つことによる補正值であり、これまでの研究により1.0から1.5までの値が得られている（Jenniskens 1994）。表1-2では、 $\gamma = 1.0$ が用いられている。

毎年ほぼ安定して多くの流星が出現する3つの流星群「しぶんぎ座流星群」「ペルセウス座流星群」「ふたご座流星群」は、3大流星群と呼ばれている。流星群（stream）は、前述のように同じ親天体から生まれた流星体の群れであるが、たとえばしし座流星群はTempel-Tuttle彗星が、ペルセウス座流星群はSwift-Tuttle彗星が親天体であることが分かっている。一方、ふたご座流星群の親天体の小惑星32000 Phaethonのように親天体が小惑星状のものである流星群もある。MDCワーキングリストでは親天体が不明な流星群が大多数を占めている。

群流星は親天体の小さな破片なので、流星群の観測研究は親天体の組成等を理解するために重要な手段となる。しし座流星群の2000年前後の出現予報を契機に、数値シミュレーションにより、彗星から放出されたモデル粒子を追跡することで、流星群の形成と進化を取り扱う理論が格段に進歩を見せ、流星群の出現予報や観測の再現がより正確に行えるようになった（Asher 2000; Vaubaillon et al. 2005a, 2005b; Jenniskens 2006）。しかしながら、流

---

<sup>2</sup> <https://www.nao.ac.jp/new-info/meteor/index.html>

星群とその親天体の関係の理解にはこれで解決したわけではなかった。3大流星群であるしぶんぎ座流星群やふたご座流星群の親天体は、彗星ではなく小惑星と同定されている。さらには、すでに説明をしたように枯渇彗星の存在も指摘されている。このように、彗星、小惑星と流星の相互関係に関しては多くの未解決の課題残っている。本論文では、流星体が親彗星から放出される速度に注目し、過去に大出現が観測されたときの放出速度と比較して3倍以上大きな速度で放出されたモデル粒子からなる流星群の出現予報を観測から検証するとともに、モデルの予想と観測との比較により流星群の特性についての研究をおこなった。さらには、流星群を生み出した親天体である彗星の活動履歴・物理的進化をこの理論と流星群の観測を組み合わせて調べるという新たな手法（Watanebe et al. 2005）により、これまでの観測からは明らかにできなかった彗星の物理的な進化についての研究を行った。

序章では、流星、流星群についての研究の歴史的展開と観測法の概要と述べるとともに、流星群の出現予報について、これまで行われてきた方法と2000年前後に確立した新しい理論に基づく方法を述べる。そのうえで、この新しい理論に基づく手法を使って本論文で明らかにしようとしている具体的テーマについて述べる。

表 1-2 主たる流星群

流星群名	出現期間	極大	輻射点		極大時 ZHR	親天体
			赤経(°)	赤緯(°)		
しぶんぎ座流星群	1月1日～1月7日	1月4日頃	230	49	120	小惑星2003EH1?
4月こと座流星群	4月16日～4月25日	4月22日頃	271	34	18	C/1961 G1Thatcher彗星
みずがめ座η流星群	4月25日～5月20日	5月6日頃	338	-1	40	1P/Halley彗星
みずがめ座δ南流星群	7月15日～8月20日	7月30日頃	340	-16	16	
ペルセウス座流星群	7月20日～8月20日	8月13日頃	48	58	100	109P/Swift-Tuttle彗星
10月りゅう座流星群	10月6日～10月10日	10月8日頃	262	54	20?	21P/Giacobini-Zinner彗星
オリオン座流星群	10月2日～11月7日	10月21日頃	95	16	15	1P/Halley彗星
おうし座南流星群	10月15日～11月30日	11月6日頃	52	15	5	2P/Encke彗星
おうし座北流星群	10月15日～11月30日	11月13日頃	58	22	5	2P/Encke彗星
しし座流星群	11月5日～11月25日	11月18日頃	152	22	15	55P/Tempel-Tuttle彗星
ふたご座流星群	12月5日～12月20日	12月14日頃	112	33	120	小惑星3200 Phaethon

(注)

主として国立天文台のホームページ<sup>3</sup>、天文年鑑2018年版（誠文堂新光社）、理科年表（平成30年度）による

極大時 ZHR は、活動の極大時における天頂1時間流星数（zenithal hourly rate）を示している。

<sup>3</sup> <https://www.nao.ac.jp/astro/basic/major-meteor-shower.html>

## 1-1 流星・流星群研究の歴史的経過

流星観測と研究の歴史的な経過は以下の通りである。流星は、古くは紀元前から多くの記録（中国古代天象記録総集 1988）に残っているが、流星が科学的な研究の対象となったのは 18 世紀末である。1794 年の秋にドイツの Chladni は、複数の隕石落下の調査した結果から、隕石は地球外の宇宙空間からやってきたもので、流星も隕石と同様に宇宙空間からやってきたと推測した。この考えに触発されたゲッチンゲンの学生、Brandes と Benzenberg の二人は、1798 年に約 15km 離れた 2 点から流星の共同観測を行った。その結果、22 個の流星が 2 点から同時に見られた同一流星と考えられ、それから流星の発光点の高さの平均値として約 98km という値を得た (McKinley 1961; Olivier 1925)。これらの研究は、流星のパイオニア的科学的研究として大きな評価に値するものであるが、一般の関心と呼ぶことはなかった。1833 年 11 月 11 日におこったしし座流星群の大出現により流星が広く一般の人に関心を引き起こすとともに、流星が天文学として著名な天文学者に観測と理論の両面で注目されるきっかけとなった (Olivier 1925)。

エール大学の Olmsted は、1833 年の大出現の観測結果から、流星は「輻射点」から出現していることを見出し、輻射点の理論を確立した (McKinley 1961)。また、これを契機に過去の流星の大出現記録が調査されるとともに、しし座流星群以外の流星群の存在も調べられるようになった。さらにはイタリアの Schiaparelli が 8 月に出現するペルセウス座流星群と Swift-Tuttle 彗星の軌道が一致することを見出したのをはじめ、しし座流星群と Tempel-Tuttle 彗星とが同一軌道であることが判明し、周期彗星と流星群の間に密接な関係があることが明らかになった (McKinley 1961)。このようにして 19 世紀中盤に流星群と彗星との関連が明らかになって以降、流星の軌道や物理的な性質、さらにはそれらと他の太陽系小天体との関係が太陽系天文学という視点から研究されるようになった。

## 1-2 流星の観測法

流星は、前述のとおり発光と電離が同時に起こる現象であり、その観測法は、光学的な方法と電波を利用した方法とに分けられる。光学観測には、観測手段により人間が肉眼で行う眼視観測、写真技術を利用した写真観測、ビデオ技術を利用したビデオ観測がある。流星の電波観測は、電離した自由電子が電波を散乱する性質を利用した方法である。送信点から発射された電波が流星により散乱され受信点で観測された受信電波をエコーと呼んでいる。

眼視観測は、星空を見上げて、肉眼で流れた流星を記録する観測方法で、世界各地でアマチュア天文家が中心となって実施している。流星群の活動の観測結果は国際的な流星観測者の組織である International Meteor Organization (以下 IMO と略する) が集約して発表している。日本国内の眼視観測結果は、日本流星研究会 (以下 NMS と略する) が集約して発表している。本論文においても (第 2 章)、眼視観測結果との比較には、IMO と NMS で集約され公表されたデータを利用した。

写真観測は、カメラを使って流星の飛跡を静止面上に記録する観測法であり、記録された



データの客観性、正確さは眼視観測よりも非常に高い。流星飛跡の位置測定誤差は、眼視観測では熟練した観測者でも約3度 (McKinley 1961) であるのに対して、写真観測では焦点距離 50mm のレンズ (35mm 版での標準レンズ) を使用した場合で 0.01 度を超えない。写真観測は、カメラとそれを固定する三脚があれば実施でき、流星を撮影すること自体は容易にできる利点がある。現在では、写真観測の機材は、フィルムを使ったカメラから CMOS センサーを撮像素子としたデジタルカメラへと大きく変わった。高感度デジタルカメラを使用することによりフィルムカメラよりは暗い流星が撮影できるようになった。しかしながら、感度では高感度のビデオカメラには及ばないことや写真観測単独では流星の出現時刻が分からないこと、ビデオでは容易に測れる流星の角速度が写真観測では回転シャッターなどの特別な機材を組み合わせて使わないと測れないこともあり、現在では、観測手法としては主流ではなくなっている。

現在の光学観測の主流はビデオ観測である。1980 年代中頃から映像を数万倍に増幅するイメージ・インテンシファイアー (以下 I.I. と略する) を使用したシステムが流星観測に用いられるようになった (Fujiwara 1993; Hawkes 1993)。焦点距離 85mm のレンズをこのシステムで用いたときには、肉眼では見えない +8 等級の流星を観測することができる。それに加えて 2000 年ころからワテック社の WAT-100N のような小型の高感度 CCD ビデオカメラが流星観測に使用されるようになった。小型高感度 CCD ビデオカメラに焦点距離 8mm のレンズを用いたときには、最も暗いもので +4 等級の流星を観測することができる。この小型高感度 CCD ビデオカメラによる観測は、比較的安価 (5 万円以内) であり、2001 年のしし座流星群の大出現を契機に急速に普及した。その後、パソコンの高機能化・高速化とデジタル技術の進歩によりビデオ観測の効率化・自動化が進み、現在では、ビデオ信号をリアルタイムでパソコンに取り込み、流星を自動的に検出して画像データとして保存する観測法が行われている (SonotaCo 2009, 2016)。今回の研究では、I.I. を用いたシステムと小型高感度ビデオカメラの両方の観測装置を観測対象・目的に応じて使用した。より具体的な観測システムや解析法については、個々の章で具体的に述べる。

流星の電波観測 (McKinley 1961 が詳しい) には、流星が流れた経路にできたプラズマのチューブ (これを流星飛跡という) 中の自由電子からの電波の散乱を利用する方法 (具体例: Brown et al. 2008) と、流星体の周辺にでき流星とともに動いていくプラズマ密度の濃い部分により散乱された電波を利用する方法 (具体例: Kero et al. 2012b) とがある。前者で観測されたエコーを飛跡エコー、後者をヘッドエコーという。電波観測は天候や昼夜の区別に左右されずに実施できるということが大きな利点である。今回の研究は、ヘッドエコーを観測することにより得られたデータを用いて行った。実施したヘッドエコー観測については、2-2 で説明している。

### 1-3 流星群の軌道

地球が太陽の周りを公転する軌道を含む平面を黄道面と呼ぶ。黄道面上では春分におけ

る太陽の方向（春分点の方向）を経度（黄経）の原点とする。現在は、2000年1月1日12時 UT の春分点を基準にとっている。

流星群の軌道は、彗星や小惑星の軌道と同様に離心率（ $e$ ）、軌道半長径（ $a$ ）、昇交点黄経（ $\Omega$ ）、軌道傾斜角（ $i$ ）、近日点引数（ $\omega$ ）5つの軌道要素で示される（図1-4）。なお図1-4では上方が北、下方が南に対応している。流星群の軌道上で太陽にもっとも近づく点が近日点と呼ばれる。流星群の軌道を含む平面と黄道面とは太陽を通る一つの直線で交わり、流星群はこの直線と2か所で交わる。

離心率は、軌道の形を表す量で、軌道半長径を  $a$ 、半短径を  $b$  としたとき

$e = \sqrt{1 - (b/a)^2}$  で表される。すなわち、形がどれだけ円から離れているかを表す値である。 $e=0$  が真円、 $0 < e < 1$  が楕円、 $e=1$  が放物線、 $e > 1$  が双曲線になる。昇交点黄経、軌道傾斜角、近日点引数の3つの要素は、太陽系内で軌道がどのような向きに位置するかを表す。昇交点黄経は、流星群の軌道が南から北へ黄道面を通過する点の黄経、軌道傾斜角は、流星群の軌道面と黄道面とのなす角、近日点引数は、昇交点から流星群の軌道上の動きにそって近日点まではかった角度である。この5つの軌道要素が決定されれば、近日点での太陽までの距離（近日点距離（ $q$ ））および公転周期（ $p$ ）は一意的に決まる。主要流星群の軌道要素を表1-3に示す。

表 1-3 主たる流星群の軌道要素

流星群名	軌道半長径( $a$ )	離心率( $e$ )	昇交点黄経( $\Omega$ )	近日点引数( $\omega$ )	軌道傾斜角( $i$ )	近日点距離( $q$ )
	(au)		(°)	(°)	(°)	(au)
しぶんぎ座流星群	2.526	0.614	283	171	71	0.975
4月こと座流星群	27.059	0.966	32	214	80	0.920
みずがめ座 $\eta$ 流星群	9.517	0.940	44	96	164	0.571
みずがめ座 $\delta$ 南流星群	1.643	0.958	306	155	28	0.069
ペルセウス座流星群	9.204	0.902	140	149	113	0.902
10月りゅう座流星群	2.555	0.611	195	171	30	0.994
オリオン座流星群	3.849	0.854	27	87	164	0.562
おうし座南流星群	2.071	0.830	37	115	5	0.352
おうし座北流星群	2.185	0.843	224	296	3	0.343
しし座流星群	9.929	0.901	235	173	161	0.983
ふたご座流星群	1.375	0.896	261	324	24	0.143

(注)

主として理科年表（平成30年版）による

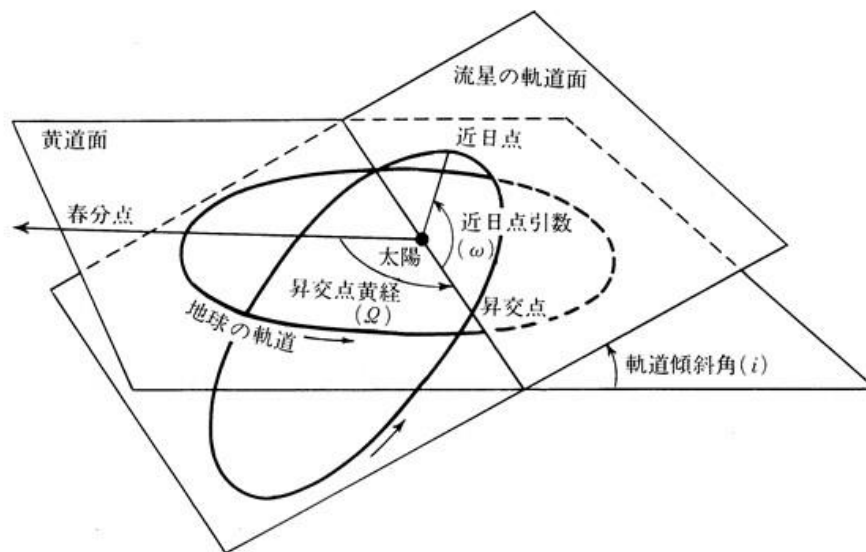


図1-4 流星の軌道と軌道要素 流星の軌道は降交点で地球軌道と交差(流星が出現)している。寺田(1984)による

#### 1-4 流星群の形成と進化

彗星から流星体が放出されるメカニズムは以下のように考えられている。彗星が太陽に接近すると、太陽熱で次第に表面が溶かされて彗星核の氷成分が昇華されてガスとして噴出される。これに伴って流星体が宇宙空間に放出される(図 1-5 上の図)。この流星体は、初期の放出速度や太陽輻射圧の影響によって、親天体とは軌道が微妙に異なるために、親天体からゆっくりと離れていく。親彗星の近日点で親彗星の進行方向へ放出された流星体 A は、親彗星よりもわずかに大きい速度を持つため、親彗星よりも軌道半長径がわずかに大きくなり、周期はわずかに大きくなる。このため、親彗星が近日点に戻ってきたとき、流星体 A は彗星よりも遅れて後方 A1 にいる。次の回帰のときには A2 に、さらにつぎは A3 にいる(図 1-5 下の図)。これとは反対に、親彗星の進行方向後方に放出された流星体 B は、軌道半長径がわずかに小さく、周期はわずかに短くなり、流星体は親彗星の前方 B1、B2、B3 に帰ってくる。この結果として、放出された流星体は親彗星の前後に伸びるようになり、ダストトレイルと呼ばれる構造を形成する。親天体の彗星の軌道自体も彗星の回帰ごとにわずかに変化するので、回帰ごとに彗星から放出された異なったダストトレイルが形成されることになる。したがって流星体の分布は、個々のダストトレイルの集合体としてあらわされることになる(図 1-6)。ダストトレイルのいずれかに地球が遭遇した時に流星群の大出現が見られる。2001 年 11 月のしし座流星群の大出現のときの状況を図 1-7 に示す。ダストトレイルは軌道上を周回していく中で前後に伸びて拡散していくとともに惑星の重力による摂動を受けて軌道が変化していく。この結果として、個々のダストトレイルは次第に分離できなくなり軌道全周にわたって幅広く流星体が分布する流星群(stream)に進化していく。このような流星群では、毎年コンスタントにほぼ同じ程度の活動を見せるようになる。これを定常群という。さらに時間が経過すると、親天体である彗星がガスやダストを放出する彗星としての物理的な活動を停止したり(枯渇彗星)、彗星自体が消滅することによる流星体の供給が止まることや流星群(stream)自体の進化により地球軌道と交差しなくなったり拡散しすぎて流星群(shower)として認識できなくなると考えられている。流星群に属してなくてランダムに出現する流星を「散在流星」という。散在流星の大部分は、上述した流星群の進化の結果だと考えられている。このように流星群の形成から進化の過程を具体的に親天体からのダストトレイルの形成とその進化としてとらえることが 1990 年代の末よりにより行われるようになった。このような考え方をダストトレイル理論という(レビュー論文の Watanabe 2005 とその引用文献参照)。

#### 1-5 流星群の出現予報

ある天体を親天体とする流星群が出現するためには、その親天体から放出された流星体の流れ(meteoroid stream)が地球軌道と交差することが必要条件になる。彗星のダストトレイルそのものがとらえられた例は赤外線衛星による観測等でいくらかはあるが(Skyes & Lien 1990; Ishiguro et al. 2002; Sarugaku et al. 2015)、ほとんどの場合、太陽系空間では直

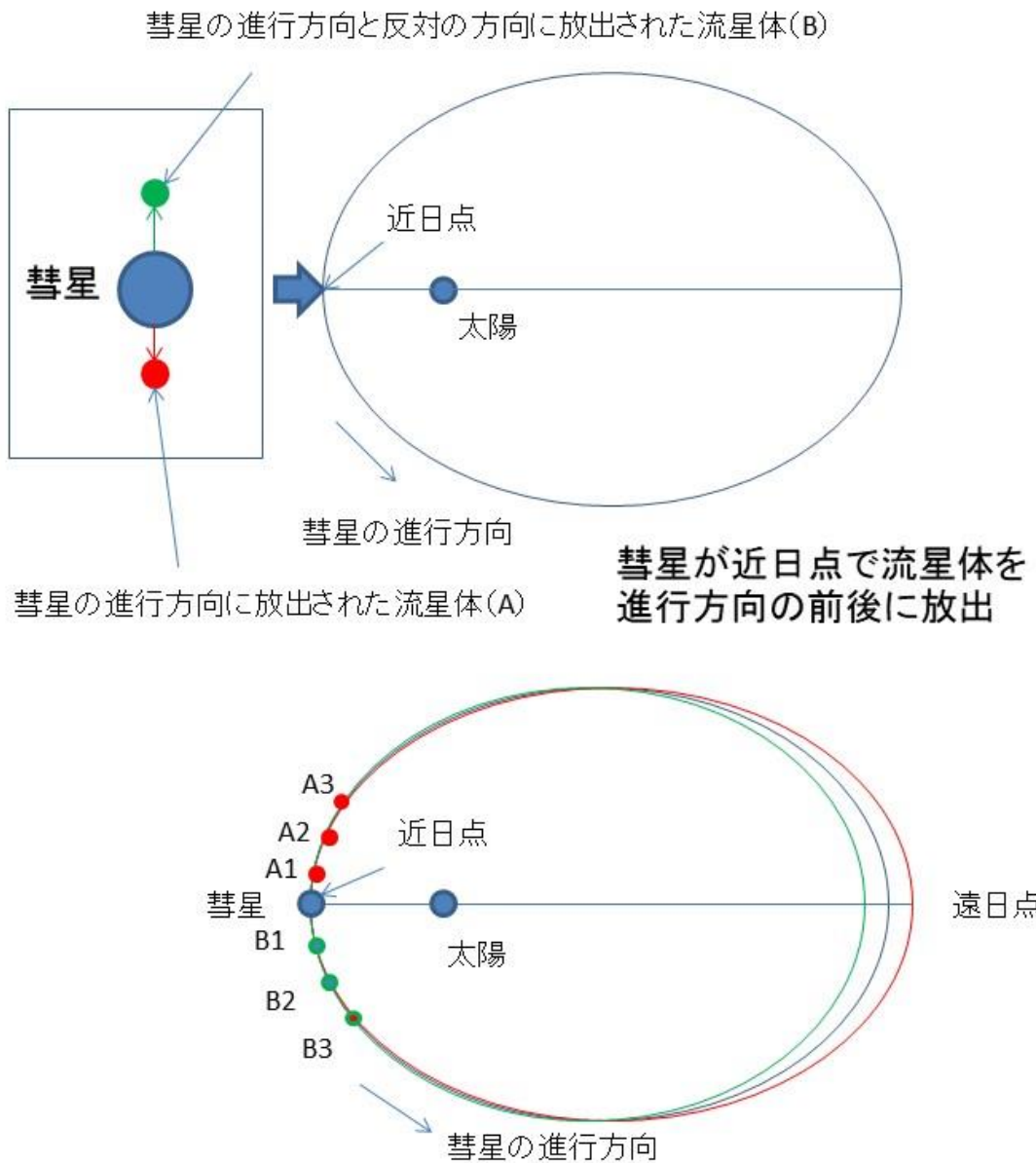


図1-5 流星体の放出とダストトレイルの形成. 流星体Aは、彗星の進行方向に放出され、流星体Bは、進行方向と反対方向に放出された。A1,A2,A3とB1,B2,B3は、それぞれ1回帰、2回帰、3回帰後の彗星が近日点通過時の位置を示している。

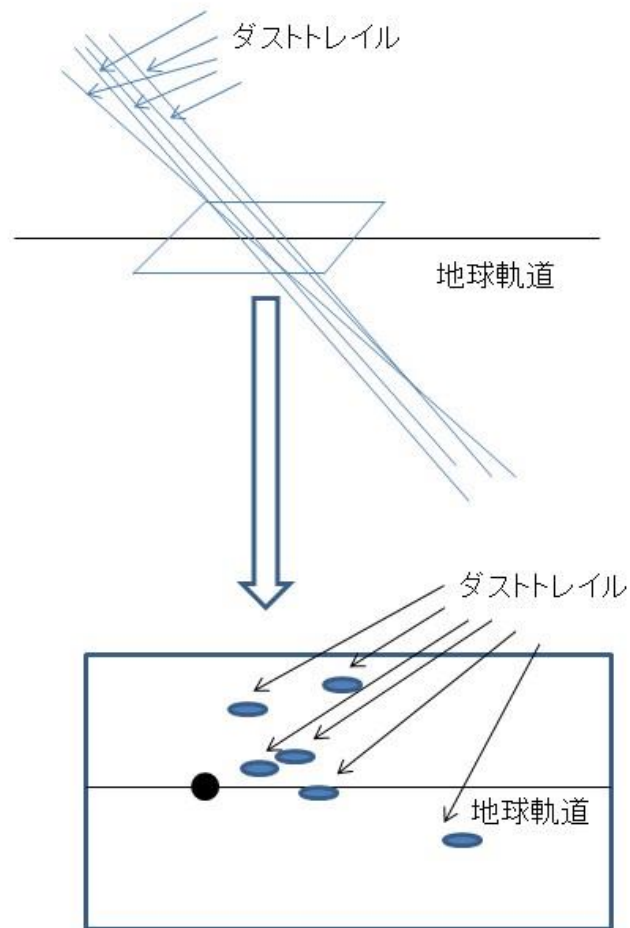


図1-6 ダストトレイルの地球軌道との関係  
 ダストトレイルの地球近傍での分布の概念図で下の図は、黄道面上で地球軌道とダストトレイルとの位置関係を表している。

McNaught & Asher (1999)の予報

Armagh天文台のホームページより

<http://star.arm.ac.uk/leonid/info2001.html>

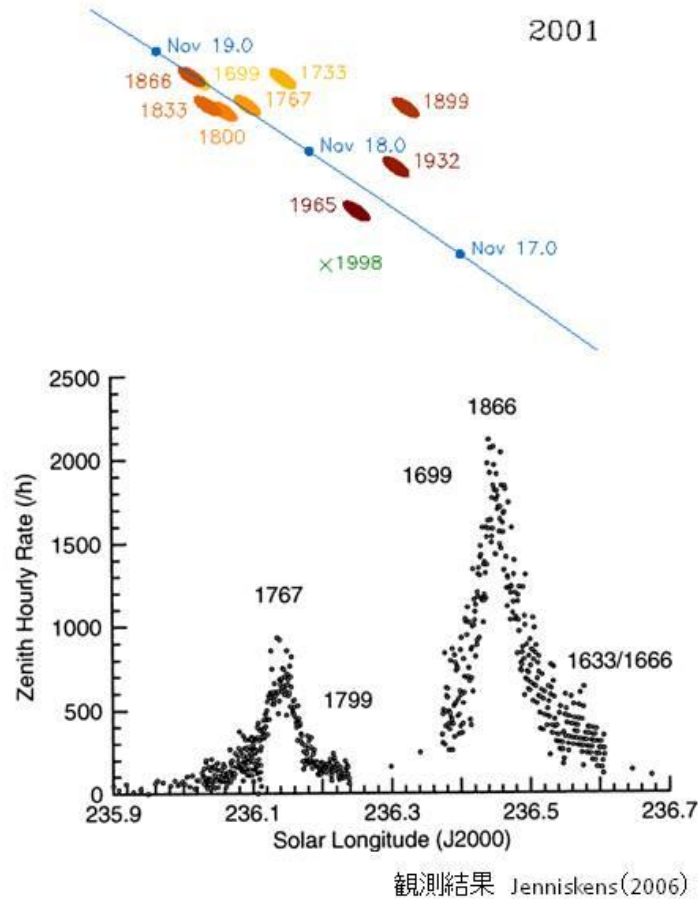


図1-7 2001年のしし座流星群のダストトレイルの分布と観測結果上の図は、McNaught & Asher (1999)によるダストトレイルと地球との位置関係を示している。ダストトレイルに添えられた数字は、親彗星から流星体が放出された年を示している。下の図は観測から求められた群流星の活動の時間変化を示している。(Jenniskens 2006)。年表示の位置がダストトレイルとの最接近時刻を示している(1799年は1800年の誤り)。

接的にダストトレイルを観測することはできない。したがってダストトレイル理論による流星群の出現予報が行われる以前（1990年代前半まで）には、流星体の密集部の空間分布が正確に分からなかったため、流星群の親天体回帰のタイミングとその軌道が出現予報のよりどころとなっていた。特に肉眼で1時間に1,000個を超えるような流星嵐(meteor storm)といわれる大出現を起こした流星群については、過去の出現状況と親天体の軌道や地球との位置関係が重要な視点となった。以下にダストトレイル理論が確立される以前のこのような流星群の出現予報について述べる。

しし座流星群に関する Yeomans (1981) の研究を以下に示す(図 1-8)。図 1-8 の縦軸 (P-E) は、Tempel-Tuttle 彗星の降交点における地球軌道との距離で天文単位で示したものである。横軸は、彗星が降交点を通過してから地球が通過するまでの日数差で、流星体の彗星からの距離を意味する。この図から、過去の大出現は、地球軌道が彗星軌道の外側 0~0.015au 以内にあるとき、彗星が降交点を通過してから 3,4 年の間に多くの場合起こっていることがわかる。従来はしし座流星群についてこの条件に照らして出現予報が行われ、1998、1999 年に大出現する可能性が指摘されていた (Mason 1995、渡部 1998)。しかしながら過去の出現例でのすべてがこの条件を満たしていたわけではなく、また逆に 1932 年は「好条件」であったにもかかわらず大出現は報告されていない (Jenniskens 2006)。大出現予報は、経験則であり、あくまでも確率的に高いということに留まった (渡部 1998)。また、1972 年の 10 月りゅう座流星群は、降交点での彗星と地球軌道との距離は 0.0008au で、降交点通過日の差は 58 日という「好条件」であったが群流星は出現しなかった。

Stoney & Downing (1899) は、流星群の出現予報を惑星の摂動による流星体の軌道自体の変化を考慮して行った。しかしながら、その後は長年にわたって流星体自体の軌道進化の研究は行われなかった。1966 年のしし座流星群の大出現を契機にロシアの研究者がコンピューターを利用してモデル粒子を数値積分することによりその軌道の変化を追跡して流星群 (shower) の大出現を再現する研究を始めた (Kazimircuk-Polonskaja et al. 1968)。Kondrat'eva & Reznikov(1985)は、1985 年に後のダストトレイル理論と同じ手法によりしし座流星群の出現予報を行っていた。この研究は、当初、ロシア語で発表されたこともあって注目をあびなかった。

McNaught & Asher (1999) は、1999 年のしし座流星群の活動の直前にダストトレイルモデルを基にした方法で流星群の出現予報を公表した。彼らは、親彗星が近日点を通過したときに軌道半長径をわずかに変化させた多くの流星体の軌道を全惑星の摂動を考慮して計算し、予報対象年に流星体が地球軌道との交点を通過するときにちょうど地球がそこに出会わせて流星が出現する、という条件を満たす流星体の軌道を探すことにより、流星群の大出現の予報を行った。これは、ダストトレイルを構成する流星体そのものの軌道を調べたもので、これまでの親彗星の軌道のみによつて行われた予報とはまったく発想が違う考え方であった。観測された 1999 年のしし座流星群の大出現の極大時刻は、彼らの予報と数分以内の精度で一致した (Arlt et al 1999)。また、同じ手法で行われたしし座流星群の 2001



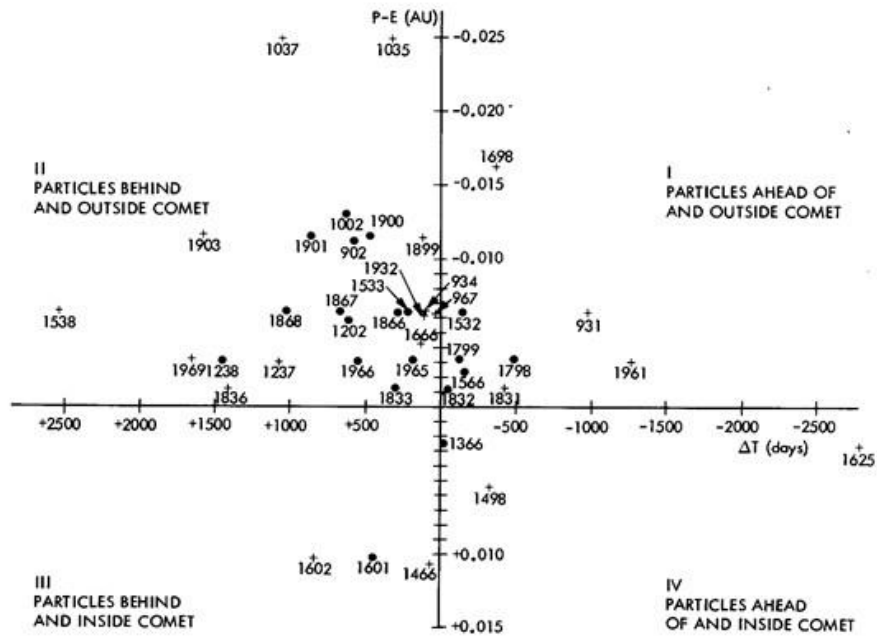


FIG. 1. Dust particle distribution surrounding comet Tempel-Tuttle as deduced from Leonid meteor shower data. The ordinate represents the distance (in AU) that Leonid shower particles were inside or outside the orbit of the parent comet and the abscissa gives the times (in days) these particles either lag or lead the parent comet. A cross ( + ) represents a shower event whereas a filled circle ( ● ) represents a meteor storm.

図1-8 Temple-Tuttle彗星周辺の流星体の分布 (Yeomans 1981)。黒丸は確実な大流星群、+は不確実あるいは出現規模が小さかったものを示す。

年の大出現の予報 (McNaught & Asher 2001) も観測と良い一致をみた (Arlt et al. 2001)。Lyytinen(1999) も同様の手法で計算を行い同等の結果を出していた。

ダストトレイル理論により流星群の大出現の予報は分単位の精度で可能となった。この手法は、しし座流星群以外の流星群で親天体が確定しているものの出現の検証や予報にも適用された。10 月りゅう座流星群の 1933 年と 1946 年の大出現、「好条件」と考えられた 1972 年の不出現もダストトレイル理論から説明がつくことが分かった (渡部等 2006)。

## 1-6 この研究の目的

前節で述べたように、ダストトレイル理論により親天体である彗星や小惑星からの具体的な流星体の放出を想定して、その放出された流星体自体の軌道進化を計算機でシミュレーションすることにより、流星群の出現予報や過去の出現を再現できることが明らかになった。さらには、ダストトレイル理論により計算された流星群の出現予報と流星群の観測とを比較することにより、流星体が放出されたときの親天体の活動度を推測するという新しい手法が提案されている (Watanabe et al. 2005; 渡部等 2006)。本論文では、ダストトレイル理論により出現が予報された流星群を実際に観測し、その出現を検証すること、観測された流星群の活動から親天体である彗星の過去の活動を推定することの二つの視点からダストトレイル理論を活用した観測的研究をおこなった。

最初に、ダストトレイル理論により出現予報された流星群の出現を観測から検証することを目的とする研究を行った。具体的には、親彗星からの流星体の放出速度が極めて速いダストトレイルからの流星群に注目した。放出速度の極めて速い流星体は質量が小さいことが推定されており (古在 2002)、このようなダストトレイルからの流星群の出現については、過去に肉眼での観測報告はなかった (中野 2002)。そこで近年に開発された高感度ビデオ観測システムと高感度のレーダーシステムを用いることによるより暗い (質量の小さい) 流星まで検出可能な観測を、2002 年のしし座流星群と 2012 年の 10 月りゅう座流星群の二つのケースについて行った。観測結果から流星群の出現の有無を確認し、流星群の特性、特に光度 (質量) 分布を明らかにすることでダストトレイル理論の検証を行った。

次に、ダストトレイルによる流星群の活動予報と実際の流星群観測結果とを比較することにより、親天体の彗星としての物理的な進化、活動履歴を調べた。この新たな手法は、Watanabe et al. 2005, 渡部等 2006 などで提唱されたものであり、本論文では、この手法をほうおう座流星群とその親天体との関係に適用した。ほうおう座流星群は、1956 年の突発出現以降には 2014 年までに活発な活動は観測されていなかった。また、親彗星 (Blanpain 彗星) 自体も 1819 年に初めて観測されて以来 2003 年に偶然に小惑星として検出されるまで観測がなかった。もし、Blanpain 彗星が 20 世紀初頭の彗星自体が観測されていなかった期間にも彗星として流星体を放出していたら、2014 年 12 月に流星群 (shower) 出現することがダストトレイル理論により予報された。この予報期間にほうおう座流星群が出現するかどうかと、その出現の規模を流星観測によって調べることで、20 世紀初頭に親天体が

彗星活動をしていたかどうか、またその程度を明らかにすることが可能である (Sato & Watanabe 2010)。そこでほうおう座流星群の 2014 年の出現予報 (Sato & Watanabe 2010) をもとにアメリカ東海岸で観測を行い、その結果から親天体の活動履歴を求める研究を行った。これは流星群の活動の観測から彗星の物理的活動履歴を推定する新しい研究手法の最初の適用例である。

さらに、このような流星群と親天体との相互関係に係る研究を進めていくためには、流星群の詳しい観測と分析が必要であるため、新たな流星群の探索を行った。流星群の観測はこれまで主として北半球で行われてきたため、南半球の流星群は観測例が極端に少ない。MDC の確定流星群では、全流星群 112 個中で輻射点の赤緯がマイナスのものは 29 個 (25.9%)、マイナス 35 度より南のものはわずかに 4 個 (3.6%) しかなく、赤緯がプラス 35 度より北のものが 37 個 (33.0%) であるのと対照的である。また、南天で活動する流星群の研究自体も少ない (Jenniskens 2016d)。南天での流星群の活動、特にこれまで知られていない流星群を検出して親天体との同定を行うことは、南北両半球に研究対象を拡大するという面から重要である。そこで第 53 次日本南極地域観測における公開利用研究として、南極昭和基地に高感度ビデオカメラを設置して南天で活動する流星群検出を目的とした光学観測を実施した。

なお、本研究の 2-1、2-2、3 は著者が筆頭の発表論文が基になっている。

2-1 : Fujiwara et al.(2003)

2-2 : Fujiwara et al.(2016)

3 : Fujiwara et al.(2017)

## 2 ダストトレイル理論の検証と観測された流星群の特性－親天体から高速で放出された流星群の場合

この章では、親彗星からの流星体放出速度が大きいダストトレイルからの流星群の出現予報を観測から検証するとともに、ダストトレイル理論からの予想と観測との比較により流星群の特性を明らかにすることを目的として行った研究について論述する。2002年のしし座流星群と2012年の10月りゅう座流星群の二つのケースで研究を行った。

### 2-1 2002年のしし座流星群の1回帰ダストトレイルの活動

この節では、1965年に放出されたしし座流星群のダストトレイルの1回帰後である2002年11月17日の出現予報に関して高感度ビデオカメラでの観測を行い、その結果について検討した研究について論述する。

親彗星からの流星体の放出速度とダストトレイルに関わる先行研究の主なものは以下のとおりであった。Kozai (2002) が、しし座流星群の親彗星からの流星体の放出についての理論を提唱を受け、中野 (2002) は、その理論にもとに過去に起こったしし座流星群の極大時刻の計算を行った。その結果は、McNaught & Asher (1999) ともよく一致しており、過去の大出現記録をよく再現していた。Kozai (2002) の理論からは、彗星からの流星体の放出速度が直接計算できるので、中野 (2002) は、流星体の親彗星からの放出速度とそのダストトレイルからの出現した流星群の出現数や明るさを主として調べた。出現記録は主としてBrown (1999) が調査した結果が用いられた。その結果、中野 (2002) は、明るくて見やすい流星群の大出現 (流星嵐) が起こるときの流星体の放出速度の最大値は  $10\text{m s}^{-1}$  から  $15\text{m s}^{-1}$  にあることを指摘した。これより速い速度で放出された流星体で起こった大出現は、1966年ダスト放出 (2公転前、放出速度  $16.7\text{m/s}$ )、1833年ダスト放出 (1公転前、放出速度  $17.7\text{m s}^{-1}$ )、1867年ダスト放出 (1公転前、放出速度  $36.9\text{m s}^{-1}$ ) のいずれの場合も、流星体の放出後2回帰 (2公転) 以内の若い流星体によることも併せて指摘していた。

Kozai (2002) の方法では、流星体の放出速度は計算上の見かけのものであり、実際の放出速度には太陽輻射圧による影響が加わっている。流星体が小さいものほど、太陽輻射圧の影響は大きく、したがって放出速度が実際には大きくなるので、古在 (2002) は、放出速度が大きいほど、流星体が小さいと推定できるとした。

McNaught & Asher (1999) は、1965年に放出されたダストトレイルが1公転後の2002年11月17日20:13 (UT) に地球に接近すると指摘した。Jenniskens (2002)<sup>4</sup>は、同じく1965年に放出されたダストトレイルが約43分早い2002年11月17日19時30分 (UT) に接近すると指摘した。しかしながら、両者ともにこのダストトレイルからの流星群 (shower) の出現は期待できないという予報であった。これは、ダストトレイルが1公転後に地球に接近するためには大きな放出速度が必要とされるためで、実際、中野主一の計算

---

<sup>4</sup> <https://leonid.src.nasa.gov/1998-2002.html>

(中野 2002 私信) では、 $88.9\text{m s}^{-1}$  の放出速度が必要であり、このような大きな速度で放出された流星体のサイズはたいへん小さいことが予想され、顕著な流星として観測できないとされた。また、中野 (2000) がまとめた過去の大出現記録にも放出速度が  $40\text{m s}^{-1}$  を超えるものはなかった。

1980 年代後半からの高感度ビデオカメラ技術の進歩は、肉眼で見ることができない暗い流星の観測を可能としてきた (Hawkes & Jones 1986, Hawkes 1993, Fujiwara 1993)。そのため、放出速度が大きく小さな流星体であるダストトレイルによる流星が観測可能となると著者らは考えた。そこで大きな速度で放出・形成されたためサイズが小さいと考えられる 1965 年に放出されたダストトレイルからの流星群 (shower) が存在するかどうか、またどのような光度分布をしているのかを明らかにするための観測を行った。

### 2-1-1 観測

2002 年 11 月 17 日に多地点でのビデオカメラ観測を実施した。観測地と観測機材を表 2-1 に示す。ビデオカメラシステムは、第 2 世代のイメージ・インテンシファイアー (image intensifier 略して I.I.) を装着したデジタルビデオカメラあるいは 8-mm ビデオカメラで構成したものを用いた。データは NTSC フォーマット (1 秒あたり 30 フレーム、インターレース) で記録した。暗い流星に対応するために、対物レンズには大口径で F ナンバーの小さな明るい望遠レンズ (200mm F2.0 (観測地 1) と 200mm F1.8 (観測地 2)) を使用した。また、多点からの同時流星を得るために、準望遠レンズの 85mm のシステムを用いた (図 2-1)。さらに明るいしし座流星群流星の出現数をモニターするために小型高感度 CCD カメラ (ワテック社、WAT-100N) に焦点距離 6mm F0.8 のレンズを付けた広角システムを動かした。

85mm カメラシステムでは、観測地 1 で 18:02 UT (以下、時刻は UT) から、観測地 2 で 18:04 から、観測地 3 で 18:28 から観測を開始し、それぞれで 20:27、20:32、20:02 まで行った。85mm カメラシステムに引き続き望遠レンズシステムと広角カメラシステムの観測を開始した。観測中に雲による中断はなかった。明け方の薄明のために 20:30 ごろにすべての観測を終了した。

それぞれのビデオカメラの観測方向は表 2-1 に示した。ビデオカメラ A、D と F は、同時流星より軌道を得る目的で地上から 100km 上空で観測視野が重なる方向に向けられた。今回の研究では、ビデオカメラ A,B,C,D と E のデータを用いた。ビデオカメラ F は、観測時間中にカメラの光量 (I.I. のゲイン) が変動したため解析には用いなかった。表 2-1 のビデオカメラ G は、ビデオカメラ A と同じ仕様のシステムである。このシステムは、2001 年のしし座流星群の観測時に、同じ観測地 (観測地 1) および条件 (観測視野方向) で使用されたものであり、2001 年の観測結果との比較に用いた。

表 2-1 観測機材と観測方向 Fujiwara et al(2003)の Table.1 を一部改変

機材 識別 名称 (ID)	観測機材	レンズ 焦点距離	観測地	観測視野 水平×垂直 $\phi$ 円形視野 (直径) ( $^{\circ}$ )	観測 方向 仰角, 方位 <sup>a</sup>	観測視野 面積 <sup>b</sup> km <sup>2</sup>	撮影限界 等級 (恒星)
A	I.I.	85mm F1.8 lens	滋賀 <sup>c</sup>	17.6 x 13.9	70, 181	1270	8~9
B	I.I.	200mm F2.0 lens	滋賀 <sup>c</sup>	6.4 x 5.1	69, 160	173	9~10
C	CCD	6mm F0.8 lens	滋賀 <sup>c</sup>	56.7 x 43.4	51, 130	29260	4.5
D	I.I.	85mm F1.2 lens	奈良 <sup>d</sup>	$\phi$ 16	84, 140	880	8~9
E	I.I.	200mm F1.8 lens	奈良 <sup>d</sup>	$\phi$ 7.6	64, 91	270	9~10
F	I.I.	85mm F1.2 lens	大阪 <sup>e</sup>	$\phi$ 16	59, 80	1577	7.5~8.5
G	I.I.	85mm F1.8 lens	滋賀 <sup>c</sup>	17.6 x 13.9	70, 181	1270	8~9

(注)

<sup>a</sup> 視野中心の方向 北 ( $0^{\circ}$ ) で東周り

<sup>b</sup> 流星出現高度 (118.5 km) での観測視野面積

<sup>c</sup> 滋賀県信楽町 (信楽 MU 観測所) 東経: 136.11° 北緯: 34.85°

<sup>d</sup> 奈良県室生村 (室生観測所) 東経: 136.01° 北緯: 34.57°

<sup>e</sup> 大阪府貝塚市 東経: 13.39° 北緯: 34.39°

## 2-1-2 解析

### 2-1-2-1 同時流星

ビデオカメラ A と D で同時にとらえた流星のビデオ画像をデジタル化してパソコンに取り込み、流星経路の位置 (赤経、赤緯) と明るさを測定した。流星の対地経路と日心軌道は長谷川 (1983) による標準的な方法を用いて計算した。18:04 から 20:27 の間の観測から 93 個の同時流星の軌道が求められ、内 51 個が輻射点の位置と流星の速度からしし座流星群の流星であると判断した。加重平均した (個々の輻射点決定の誤差を重みとした) しし座流星群の輻射点の位置は、赤経: 153.4 度、赤緯: +21.7 度 (J2000.0) であった。群流星の平均軌道要素を表 2-2 に示す。観測された輻射点の位置は、Hasegawa (1990) の方法で求めた親彗星からの予報輻射点位置 (赤経: 153.5 度、赤緯: +21.7 度 (J2000.0)) とよく一致している。

### 2-1-2-2 活動の時間変化

録画されたビデオテープに記録された流星は、ビデオ画像をビデオモニター上で再生し



図 2-1 観測機材の外観（観測地:2） 左が 200mm F1.8 のシステム（ビデオカメラ E）  
右が 85mm F1.2 のシステム（ビデオカメラ D）

表 2-2 しし座流星群の平均軌道要素 Fujiwara et al(2003)Table2.を一部改変

輻射点 <sup>a</sup>	赤経 = 153.4° (±0.88° ) 赤緯 = +21.7° (±0.39° )
出現点高度	118.5 km
最大光度での高度	108.4 km
消滅点高度	101.5 km
地心速度	69.0 km s <sup>-1</sup>
軌道要素	軌道半長径( <i>a</i> ) = 3.98 (au)
(J2000.0 分点)	離心率( <i>e</i> ) = 0.752
	近日点距離( <i>q</i> ) = 0.985 (au)
	昇交点黄経( $\Omega$ ) = 235.27°
	軌道傾斜角( <i>i</i> ) = 162.37°
	近日点引数( $\omega$ ) = 172.43°

(注)

<sup>a</sup> 地心輻射点 (天頂引力と日周光行差補正済) J2000.0 分点

て肉眼で検出した。見落としを防ぐために見直しは2回実施した。さらに、共通する観測領域で同一流星を捉えるための観測を実施したビデオカメラ A と D については、一方のビデオカメラで流星がとらえられている時刻について、他方のカメラの画像に流星がとらえられているか否かを再度チェックした。流星の光度は、ビデオカメラの背景に映っている恒星と比較することにより決定した。

しし座流星群に属するかどうかの判定は、ビデオモニター上の流星の経路を中心投影法で作成した星図上に目視により手書きで記入して、その経路がしし座流星群の予報輻射点から到来しているかどうかで仮判定した。ここでは、経路の逆延長が予報輻射点の5度以内を通過する流星をしし座流星群流星の候補とした。さらに経路長と輻射点からの角距離距離 (角距離が近いほど経路長は短くなる) と流星の角速度とで総合的に判断して群流星を判定した。

図 2-2 と 2-3 は 10 分単位でのしし座流星群の出現数の時間変化を示している。図 2-2 は、焦点距離 85mm のカメラでの観測 (ビデオカメラ A、D)、図 2-3 は、焦点距離 200mm のカメラでの観測 (ビデオカメラ B、E) の結果である。図中のしし座流星群の流星数は 1 時間当たりの出現数 (hourly rate 以下 HR と表記) で示してあり、ビデオテープの交換等の観測中断時間を除いた有効観測時間から算出した値である。しし座流星群の活動を解析するために、群流星の数はしし座流星群の輻射点高度により修正した。この方法は、序章で説明した眼視観測において輻射点高度による流星の出現数を修正して ZHR を算出する方法と同様である。ビデオ観測による ZHR は、HR に  $\sin h^{-1}$  を乗ずることにより求めた。ここで、



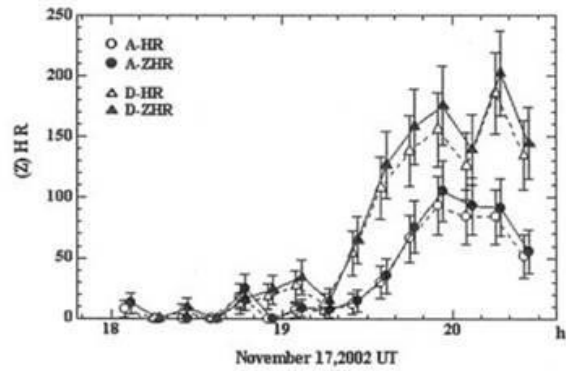


図 2-2 2002 年 11 月 17 日の 85mm レンズを使用したビデオ観測から得られたしし座流星群流星の出現数の時間変化。A、D は、それぞれ表 2-1 の観測機材の ID を示している。Fujiwara et al.(2003)より転載

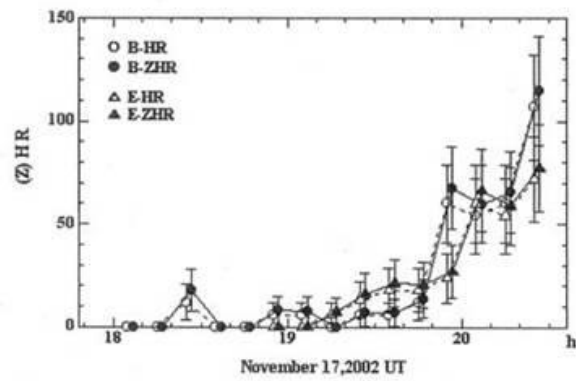


図 2-3 2002 年 11 月 17 日の 200mm レンズを使用したビデオ観測から得られたしし座流星群流星の出現数の時間変化。B、E は、それぞれ表 2-1 の観測機材の ID を示している。Fujiwara et al.(2003)より転載

$h$ は輻射点の仰角であり、 $\gamma$ は流星が有限の経路長を持つことによる補正值で、本研究では $\gamma = 1.4$ とした (Jenniskens 1994)。輻射点の位置は、ビデオカメラ A と D の同時観測で観測された流星の軌道から求めた平均値 (赤経: 153.4 度、赤緯: +21.7 度) を用いた。輻射点の仰角は、観測時間中に約 45 度から 71 度に変化した。

日本流星研究会 (以下 NMS) に報告された眼視観測の結果によると (飯山青海 2003 私信)、11 月 17 日の 18 時台 (観測者数: 5) の HR は 4.4、ZHR は、17.6、19 時台 (観測者数: 5) の HR は 6.2、ZHR は 17.6、20 時台 (観測者数: 1) の HR は、6.4、ZHR は 24.5 であった (眼視観測での HR と ZHR については序章の 7 ページを参照)。NMS の結果では $\gamma$ は 1.0、光度比 ( $r$ ) は 2.0 が使われている (飯山 2003)。2002 年の観測時間帯の 2000.0 分点での太陽黄経は 235.18 度から 235.27 度である。これに近い太陽黄経 235.0 度から 235.8 度にかけて行われた 1997 年から 2001 年までの 5 年間での NMS の眼視観測結果の平均 HR は 21.2 で平均 ZHR は 77.8 であった (飯山 1998, 1999, 2000, 2001, 2002)。このことから 2002 年の NMS に報告された眼視観測の結果は、過去 5 年間の平均よりも低調な活動であったことが明らかである。焦点距離 6mm のレンズを用いた広角ビデオカメラ (ビデオカメラ C) の観測結果は、HR と ZHR でそれぞれ 18 時台は 3.1 と 4.6、19 時台は 10.3 と 12.3、20 時台は 16.2 と 17.6 であり、やはりしし座流星群の活動は低調であった。ビデオカメラ C の最微等星は 4.5 等星であり、眼視観測での最微等星に近い。

これに対して、I.I.に焦点距離 85mm と 200mm のレンズを装着したビデオ観測 (ビデオカメラ A, B, D, E) では、観測開始から 19 時 00 分まではしし座流星群は低調な活動 (ZHR < 10) であったが、観測時間帯の後半で明らかに活発な活動があった。焦点距離 85mm のビデオカメラ A と D では、19 時 30 分付近よりしし座流星群流星は増加を始め 19 時 50 分から 20 時 20 分の間に極大に達した。極大時の ZHR は、18 時から 19 時の平均値の約 20 倍に達した。しかしながら、明け方の薄明のために 20 時 30 分頃に観測を終了したので、活動の極大時間やその継続時間 (半値幅) を求めるのは難しい。

他方、焦点距離 200mm のビデオ観測 (ビデオカメラ B, E) は、20 時 00 分付近から明確にしし座流星群流星が増加しており、この活発な活動は約 30 分間継続している。これは、焦点距離 85mm のビデオ観測と同様な結果である。さらに焦点距離 200mm のビデオ観測では、観測終了時においても群流星の数は増加していつている。この点は焦点距離 85mm のビデオ観測結果と異なっている。最大 ZHR は 115 で、これは 18 時 00 分から 19 時 00 分の平均値の約 25 倍に達する。焦点距離 200mm のビデオ観測のほうが焦点距離 85mm のビデオ観測よりも活動の増加が始まった時間が約 20 分遅い。このことから、より暗いしし座流星群流星の活動開始時刻が遅かったと推察できる。しかしながら、前述の焦点距離 85mm でのビデオ観測と同様に、焦点距離 200mm のビデオ観測でも極大時刻や極大値を明確に決定することはできなかった。

### 2-1-2-3 フラックス

しし座流星群のフラックスを決定するために、流星が出現する高度でのおおのこのビデオカメラがカバーする視野の面積を計算した。ここで、高度は、ビデオカメラ A と D の同時観測結果から得た平均出現高度 118.5 km を用いた。おおのこのビデオカメラの視野面積は、表 2-1 に示している。フラックスの値  $\phi$  は、次の式で得られる。

$$\phi = N / S, \quad (2-1)$$

$N$  はしし座流星群の補正された流星数、ZHR であり、 $S$  は観測視野面積である。焦点距離 6mm のレンズの場合（最微星+4.5）では、ZHR が 15 であるのでフラックスでは、 $1.4 \times 10^{-7} \text{ km}^2 \text{ s}^{-1}$  になる。この値は、Watanabe et al. (2002) で報告された 2001 年のしし座流星群の大出現のとき（11 月 18.8 日 UT）に得られた最大値（ $1.4 \times 10^{-5} \text{ km}^2 \text{ s}^{-1}$ 、最微星+3.5）より約 2 桁小さい。焦点距離 85mm のビデオ観測では、フラックスの最大値は、ZHR=202 のときで、 $6.4 \times 10^{-5} \text{ km}^2 \text{ s}^{-1}$ （最微星+9.0）であった。この値は、2001 年のしし座流星群の大出現のときの極大時に今回と同じ観測システム（ビデオカメラ G）で得られた値（ $2.8 \times 10^{-5} \text{ km}^2 \text{ s}^{-1}$ ）よりも有為に大きい。さらには、焦点距離 200mm のビデオカメラでの得られたフラックスの最大値は、ZHR=115 のときで、 $1.8 \times 10^{-4} \text{ km}^2 \text{ s}^{-1}$  であり、この値は焦点距離 85mm のビデオ観測より得られた値よりも大きい。

### 2-1-2-4 光度分布

流星の光度の分布からは流星の質量の分布を推計できるので、その観測は重要である。今回の研究では、流星の光度はビデオ画面上で背景に映っている恒星の明るさと流星経路上の最も明るいところとを比較することによって決定した。測定された流星の光度には幾分かの誤差（ $\pm 1$  等以内）はあるが、この結果から流星の光度分布を得ることができる。図 2-4 に焦点距離 85mm でのビデオ観測、図 2-5 に焦点距離 200mm でのビデオ観測で得られ光度分布を示す。比較のために、2001 年のしし座流星群の大出現時に焦点距離 85mm でのビデオ観測（ビデオカメラ G）で得られた光度分布を図 2-6 に示す。極限等級に近い等級（図 2-4 と図 2-6 では+8 等、図 2-5 では+9 等）の数の減少は見落としによるものと考えられる。そこで極限等級より 1 等級明るい等級までの範囲を議論の対象とした。ビデオカメラ B は光度+7 等の流星のほうが光度+8 等の流星よりもわずかに多いが、ビデオカメラ A、D と E のすべてで流星数は光度が暗くなるにしたがって増加している。明らかに、しし座流星群の光度分布は 2001 年と 2002 年とでは非常に大きく異なっている。2002 年では、+3 等よりも明るい群流星は全く観測されていないのに対して 2001 年では、+3 等より明るい群流星は群流星全体の 41% を占めている。肉眼で観測することができる+5 等よりも明るい群流星は、2001 年では群流星全体の 62% を占めるのに対して 2002 年ではわずかに 5% を占めるにすぎない。これらのことは、焦点距離 6mm のビデオカメラでの広角システムでの観測では、しし座流星群の活動は低調であったことと眼視観測も同様に低いしし座流星群の活動であったことと一致する。焦点距離 6mm のビデオ観測では、20 時 00 分周辺のしし座流

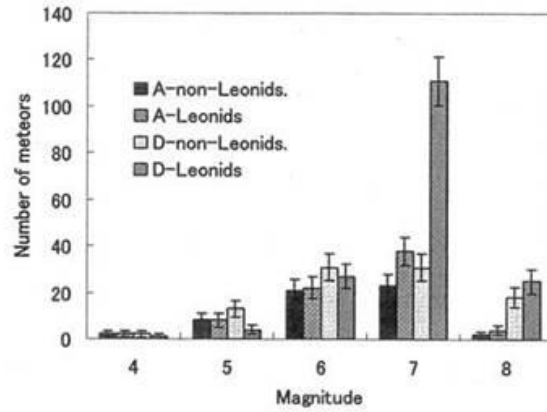


図 2-4 2002 年 11 月 17 日の 85mm レンズを使用したビデオ観測から得られたしし座流星群流星と群流星以外のそれぞれの光度分布。A、D は、それぞれ表 2-1 の観測機材の ID を示している。Fujiwara et al.(2003)より転載

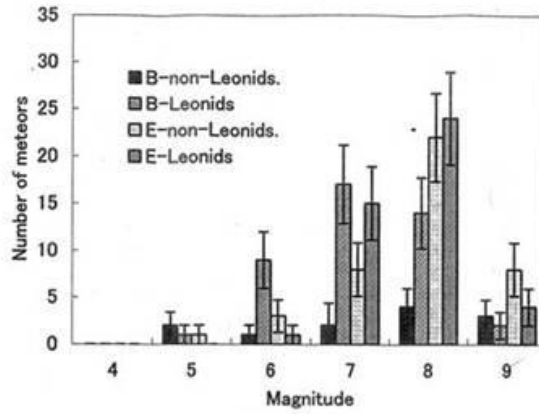


図 2-5 2002 年 11 月 17 日の 200mm レンズを使用したビデオ観測から得られたしし座流星群流星と群流星以外のそれぞれの光度分布。B、E は、それぞれ表 2-1 の観測機材の ID を示している。Fujiwara et al.(2003)より転載

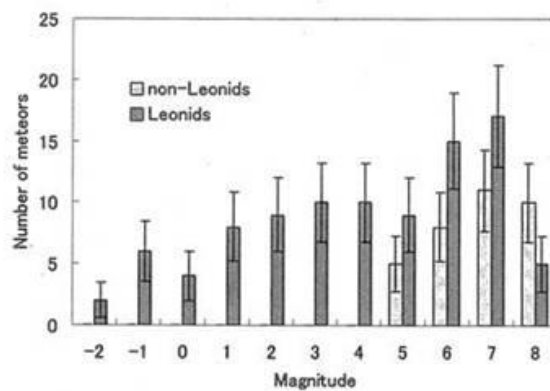


図 2-6 2001 年 11 月 18 日 16 時 30 分から 18 時 30 分 (UT) の間に 85mm レンズ (カメラ ID : G) を使用したビデオ観測から得られたしし座流星群流星と群流星以外のそれぞれの光度分布。カメラ G は、2002 年のカメラ A と同じものである。観測時間中に輻射点の仰角は、27 度から 52 度に変化した。  
Fujiwara et al.(2003)より転載

星群流星の増加を捉えていない。このことは、2002年のしし座流星群の突発出現は、主として+6等以下の暗い流星によるものであったことを示している。観測から得られた群流星の多くは+7等と+8等であった。しかしながら、今回の観測システムの極限等級は+8等から+10等であったので、真の光度分布のピークはどこにあったのかは明確に示すことはできない。

### 2-1-3 議論とサマリー

ここまでに示した結果より2002年に肉眼では観測できない6等から8等の流星を主とした非常に活発なしし座流星群の突発的な活動が起こったのは明らかである。この活動は、2002年の観測で使用したビデオカメラAと同一のシステム(ビデオカメラG)による2001年の大出現時の同じ観測場所・同じ観測視野方向での観測結果よりも活発であった。それゆえに2002年の活度は、暗い流星の嵐(faint meteor storm)と呼ぶことができる。親天体55P/Tempel-Tuttle彗星の1998年の回帰前後ではZHRが1,000を超えるしし座流星群の大出現(storm)は、1999年、2001年と2002年(Arlt et al. 1999, 2001; Jenniskens 2006)に見られた。これらの大出現は、過去の親彗星回帰前後の大出現の時と同じく肉眼で観測されたものであった。今回の親彗星が回帰した2000年前後には、肉眼では観測できない暗い流星を捉えることができる高感度ビデオカメラシステムによる観測が様々な機会に実施された(Molau et al. 1999; Campbell et al. 2001; Brown et al. 2002a, 2002b)。しかしながら、本研究の観測のような暗い流星のみでの非常に活発な活動はまったく報告されていない。したがって、今回の2002年の観測結果は、暗い流星からなる流星群の活発な活動(流星嵐)が明確にとらえられた世界で初めての事例であると言える。このような流星活動が存在するという事実は、流星群の親天体からの生成や流星群の進化に新たな視点を提供したといえることができる。

1965年に放出された流星体のダストトレイルは、McNaught & Asher(1999)の予報では2002年11月17日20時13分に、Jenniskens(2002)の予報では2002年11月17日19時30分に地球に接近すると計算された。中野主一(2002 私信)はKozai(2002)が提案した彗星からの流星体の放出にかかる理論に基づき、1965年に放出された流星体によるダストトレイルが2002年11月17日20時15分に地球に0.0018auまで接近することを見出した。この値はMcNaught & Asherの予報と非常に良く一致している。中野の計算からは、1965年の近日点での親彗星からの放出速度は $88.9 \text{ m s}^{-1}$ であった。中野は、自身の調査から過去に大出現を起こしたケースでは流星体の放出速度は $20 \text{ m s}^{-1}$ を超えるものがなかったため、この1965年に放出された流星体のダストトレイルからの流星の出現は予想していなかった(中野主一 2002 私信)。佐藤幹哉(2018 私信)の計算では、1965年の近日点で $88.651 \text{ m s}^{-1}$ で放出された流星体のダストトレイルが2002年11月17日20時12分に地球に0.00179 auまで接近することを示した。佐藤の結果は、McNaught & Asherのみならず中野の結果とも大変よく一致している。

2002年の観測からは、明け方の薄明のために真の流星群の極大時や半値幅は決定できなかった。しかしながら、11月17日の20時00分から20時30分にかけてのしし座流星群の大出現は、McNaught & Asher、中野そして佐藤の計算した1965年放出された流星体のダストトレイルの地球への最接近時刻とほとんど一致していたことは明らかである。また、中野 ( $88.9\text{ m s}^{-1}$ ) と佐藤 ( $88.651\text{ m s}^{-1}$ ) の計算による大きな放出速度は、流星体が小さいことを示している。このことは、4等以上の明るい流星が少なく+6等から+8等の暗い流星が活動の主体であったという観測結果と一致する。それゆえに、2002年11月17日のしし座流星群の暗い流星による大出現 (storm) は、1965年に放出された1回期のダストトレイルの1回帰後に生じたものである可能性が極めて高い。

本研究での高感度ビデオ観測により、主として6等から8等という肉眼では見ることのできない暗い流星が主体の流星群の大出現 (storm) を世界で初めて捉えた。また、本研究で、2002年11月17日のしし座流星群の大出現を引き起こしたダストトレイルが、親彗星から約  $89\text{ m s}^{-1}$  という非常に大きな速度で放出されたものである可能性が極めて高いことを明らかにした。このような従来は予想されていなかった大きな放出速度を持ちより小さな流星体によるダストトレイルとの遭遇による、肉眼では見えない暗い流星が主体の流星群の大出現の可能性を、今後のダストトレイルによる流星群出現予報では考慮に入れることが必要であることを意味している。今後、観測例を増やすことにより親天体からの放出速度と流星群の構造や特性 (例えば質量分布) との関係を明らかにすることは、流星群の誕生と進化を知るうえで極めて重要である。

## 2-2 2012年10月りゅう座流星群のMUレーダーヘッドエコー観測

この節では、2012年の10月りゅう座流星群のMUレーダーヘッドエコー観測の結果と考察について述べる。ダストトレイル理論による予報との比較とともに2011年のMUレーダーヘッドエコー観測の結果との比較をもとに、親彗星からの放出速度と群流星の質量についての関係について考察する。

### 2-2-1 序論

10月りゅう座流星群 (以下、りゅう座流星群) は、歴史的にはジャコビニ流星群とも呼ばれてきたが、20世紀でもっとも大規模な出現を見せた流星群の一つである。特に1933年と1946年には眼視観測でのZHRは10,000に達するほどの大出現であった (Jenniskens 2006)。りゅう座流星群の親天体は、木星族彗星 (Jupiter-family comets) である21P/Giacobini-Zinner彗星である。

ダストトレイル理論を用いた手法により、2011年10月にりゅう座流星群の活発な出現が予報された (Vaubailon et al. 2011; Maslov 2011)。予報は、光学観測とレーダー観測の両方の結果ともに良い一致をみた (Kero et al. 2012a; Koten et al. 2014; Trigo-Rodriguez et

al. 2013; Ye et al. 2013; Molau & Barentsen 2014)。

2012 年の出現については、Maslov (2011) と佐藤 (2012)<sup>5</sup>の両者が、親彗星が 1959 年と 1966 年に放出した流星体のダストトレイルが 10 月 8 日 15 時から 17 時にかけて地球に衝突する可能性を指摘した。ただし、両者ともにりゅう座流星群の大出現の可能性は非常に低いことを示唆した。Maslov (2011) は、1959 年と 1966 年のトレイルからはそれぞれ最大 ZHR で 0.5 と 0.2 程度の出現であり、それゆえに眼視観測ではほとんど活動は捉えることができないであろうと予想した。佐藤 (2012)<sup>2</sup>は、ダストトレイルの地球への接近状況が似ていた 1999 年の出現を予想するモデル計算とその観測結果と比較により、2012 年に接近するダストトレイルは過去の地球との接近により引き延ばされて密度が薄いことを考慮して、2012 年の出現数は ZHR10 未満の弱い活動が見られる可能性があることを指摘した。Maslov (2011) と佐藤 (2012)<sup>2</sup>の予報を表 2-3 に示す。

Ye et al. (2014) は、Canadian Meteor Orbit Radar (CMOR) によるレーダー観測によりりゅう座流星群の予期されていなかった 2012 年 10 月 8 日 16 時 40 分頃の突発大出現を報告した。活動のピーク時の 5 分間の観測からの ZHR 相当値は眼視観測に換算して約 9,000 であった。国際的に眼視観測データを取りまとめている International Meteor Organization (以下 IMO と表記) へ報告された眼視観測結果では、2012 年 10 月 8 日 16 時 51 分に活動のピークがあり、眼視観測の ZHR は  $324 \pm 66$  であった<sup>6</sup>。但し、IMO へ報告された眼視観測結果は、4 人のみであり、この 4 か所で観測された群流星の総数はわずか 24 個に過ぎなかった。最微星等級や雲量といった観測条件が良くなかったことにより、4 か所で得られた ZHR の値は 60 から 600 と大きくばらついていた。

滋賀県甲賀市信楽（北緯 34.85 度、東経 136.16 度）にある京都大学生存圏研究所の大型大気観測レーダーである MU レーダー（middle and upper atmosphere radar）（図 2-7）を用いてりゅう座流星群をターゲットにした流星の電波観測を 2012 年 10 月 8 日 07 時から 10 月 10 日 17 時まで実施した。りゅう座流星群の極大予報時刻の 10 月 8 日 17 時の輻射点の高度は 25 度以下と低かったが、2011 年のりゅう座流星群の突発出現のときの輻射点高度よりは高かった。MU レーダーでの観測設備、観測モードや解析手法は 2011 年のりゅう座流星群の観測とまったく同じである。この研究では、2012 年のりゅう座流星群の観測結果と 2011 年の結果（Kero et al. 2012a）との比較に焦点をあてて解析を行った。

### 2-2-2 流星のヘッドエコー

流星のヘッドエコーは、流星体が大気中を飛行するときに流星体の周辺にでき、流星体とともに動いていくプラズマ密度の濃い部分により散乱させられた電波によって生じる。最初のヘッドエコーの観測は、1946 年のりゅう座流星群の大出現のときに 150 kW の VHF レ

---

<sup>5</sup> <http://meteor.kaicho.net/mss/MSS20121007.pdf>

<sup>6</sup> <http://www.imo.net/live/draconid2012/>



表 2-3 2012 年の 10 月 りゅう座流星群の出現予報 Fujiwara et al.(2016)を一部改変

ダストトレイル	予報極大時刻	放出速度	地心輻射点		地心速度	ZHR
	2012 年 10 月 8 日	velocity*	(J2000.0)		velocity ( $V_g$ )	
	(UT)	( $m s^{-1}$ )	$\alpha_g(^{\circ})$	$\delta_g(^{\circ})$	( $km s^{-1}$ )	
Maslov (2011)						
1959	16:22					
1659	16:54					0.5
1966	15:37					0.2
佐藤 (2012 脚注 2)						
1959	16:40	+38.70	262.78	+55.84	20.99	<10
1966	16:48	+43.07	262.37	+55.76	20.91	<10
1966	17:28	+51.34	262.51	+55.60	20.96	<10
1966	17:28	+51.35	262.52	+55.61	20.96	<10

\*放出速度の+は、流星体が親天体の運動方向と同じ方向に放出されたことを示す。

ーダーシステムを用いた Hey, Parsons & Stewart(1947)により実施された。1990 年代以降、ヘッドエコー観測は、高出力・大口径 (high-power large-aperture : HPLA) レーダーにより運用されている (Pellinen-Wannberg & Wannberg 1994; Mathews et al. 1997; Close et al. 2000; Sato et al. 2000; Chau & Woodman 2004; Janches et al. 2006; Sparks et al. 2010; Kero et al 2011; Schult et al. 2013)。HPLA レーダーに加えて改良型の全天流星レーダーでもヘッドエコー観測が行われている (Janches et al. 2014)。

ヘッドエコー観測からの流星群に属する流星を対象とした観測はこれまで少なかった。HPLA レーダーは流星群に属する大きめの質量をもつ流星についても検出することができるが、アンテナのビーム幅が極めて狭いので、大きめの質量をもつ流星が観測できる可能性は低いものであった。近時、干渉計を用いた流星のヘッドエコー観測技術が開発され、これにより流星群の検出が可能となった (Chau & Galindo 2008; Kero et al 2012b; Schult et al. 2013)。しかしながら、HPLA レーダーは、普段は大気や電離層の観測に使われており、流星観測に使える時間は限られているので (Janches et al. 2014)、ヘッドエコー観測からの流星群の研究はそれほど多くはない。(Kero et al. 2011, 2012b; Kero et al. 2013)。近年、Schult et al. (2017) は、大気観測と同時にヘッドエコー観測が可能ないように観測データ取得方法を工夫することにより観測時間を大幅に増大させている。

### 2-2-3 MU レーダーによるヘッドエコー観測

MU レーダーは、周波数 46.5MHz、出力 1MW で 103 メートルの円周内 475 本のアンテナからなるアクティブフェーズドアレイを有する中層・超高層大気観測用の大型レーダー



図2-7 MUレーダー(The middle and upper atmosphere (MU) radar)

である。流星ヘッドエコー観測モードでは、それぞれ 19 本の八木アンテナで構成されている 25 グループからの出力が独立してデジタルデータとして得られる。この 25 チャンネルのデジタル受信機システムによる空間イメージングにより、流星のヘッドエコーの精密な観測が可能である (Kero et al. 2012b)。

MU レーダーのビームの半値幅は 3.6 度と他のほとんどの HPLA レーダーに比べて広いので観測視野が広く、経路の長い流星を検出する可能性は大きくなる。観測期間中のレーザービームは、天頂方向に向けられた。

りゅう座流星群の観測期間中の観測モードの設定は表 2-4 に示す。流星までの距離 (range) は、Kero et al. (2012b) により新たに開発された方法により 3.12 ms 毎に 10m のオーダー (100m 以内) での精度で決定することができる。データの処理は、2011 年のりゅう座流星群の MU レーダーヘッドエコー観測で用いられたのと同じ手法で行われた。

#### 2-2-4 観測結果

観測は、2012 年 10 月 8 日 07 時 00 分から 10 月 10 日 17 時 00 分まで実施し、流星ヘッドエコー 11,210 個を観測した。図 2-8 に全観測期間中の 1 時間単位での流星エコー数を示す。レーザー観測は、観測期間中にデータ取得システムのトラブルで 2 回停止した (10 月 9 日 15 時 00 分から 15 時 43 分までと 23 時 00 分から 23 時 11 分まで)。11,210 個の全流星の輻射点の分布は、太陽を原点とした黄経と黄緯による分布図 (図 2-9) で示している。この図では、太陽は年間を通して太陽中心黄経 0 度に位置している。地球の公転方向 (apex) は太陽中心黄経 270 度の方向である。地心速度の大小は色で示している。図 2-9 では、りゅう座流星群の輻射点の集中が明らかに見られる。りゅう座流星群の他にも、おうし座南流星群とオリオン座流星群の予想輻射点位置に輻射点の集中が見られる。

ここでは次の二つの基準によりりゅう座流星群を選別した。(1)観測された流星の地心輻射点が地心輻射点の集団の中心 (赤経: 262.5 度、赤緯: +55.5 度) から角距離で 5 度以内に位置すること。(2)観測された流星の地心速度が予報地心速度 (佐藤 2012) 21.0 km/s から  $\pm 20\%$  以内の偏差であること。(1) の 5 度という閾値は、輻射点の集団の中心からの角距離の分布 (図 2-10) から決定した。図 2-10 では、流星群の突発出現のあった 10 月 8 日 (UT) とそれ以外の日 (9~10 日 UT) とに分けてそれぞれの輻射点の数を示している。この図から、りゅう座流星群が活動していないときのいわばバックグラウンドの輻射点分布とりゅう座流星群の活動期での輻射点の分布との比較により 5 度という値が適切であると判断した。この二つの基準により 57 個のりゅう座流星群のエコーを検出した。その内の 51 個は、10 月 8 日 13 時 00 分から 20 時 00 分に観測されたものであった。

図 2-11 は、全流星の地心速度  $1\text{ km s}^{-1}$  ごとの頻度分布を示している。赤で示した部分がりゅう座流星群の数を表している。散在流星の速度は  $58\text{ km s}^{-1}$  にピークがあるのは、MU レーダーでの以前の観測 (Kero et al. 2011, 2012a) と同様である。図 2-12 は、出現高度と地心速度の関係を散布図で示した。りゅう座流星群は赤色でプロットしている。りゅう座流

表 2-4 MU レーダーによるりゅう座流星群観測時の主要緒元

設置場所	滋賀県甲賀市信楽町（北緯 34.85 度、東経 136.10 度）
レーダー形式	コヒーレントパルスドップラーレーダー
送受信周波数	46.5MHz
アンテナ開口	8,330 m <sup>2</sup> , 直径 103 m
アンテナ	直交 3 素子八木アンテナ、 475 本
ビーム幅	3.6 度（電力半値幅）
送信電力	1 MW （尖頭電力）
ビーム方向	天頂
観測高度範囲	73 ～ 127 km
パルス幅	156 $\mu$ s
パルス圧縮	13 ビットバーカー符号
パルス繰り返し周期	3.12 ms
サンプリングレート	6 $\mu$ s
干渉計	25 チャンネル

星群の出現高度と同じ速度を持つ他の流星との比較により、りゅう座流星群流星は、散在流星の平均よりも高い高度で出現していることは明らかである。この点については、Kero et al.(2012a)で詳しく議論されている。

#### 2-2-4-1 りゅう座流星群の活動度

2012 年 10 月 8 日 07 時 00 分から 10 月 10 日 17 時 00 分までの観測期間中のりゅう座流星群流星（有効観測時間による補正なし）の観測数の 1 時間あたりの時間変化を図 2-13 に示す。

従来の流星レーダーでは流星飛跡からのフレネル散乱を受信するため、送受信点間と飛跡の間の幾何学的な配置（飛跡の方向）が受信可否に大きく依存するため、流星数の時間変化の観測が難しかったが、ヘッドエコーは、電波の反射幾何学にほとんど依存しないため、流星数の変化の観測に適している（Kero et al. 2008）。りゅう座流星群の活動を解析するために、群流星の数はりゅう座流星群の輻射点高度により修正された。この群流星の輻射点高度による修正は、MU レーダーヘッドエコー観測によるオリオン座流星群（Kero et al. 2011）とふたご座流星群（Kero et al. 2013）の活動を分析するときに適用された手法である。この方法は、しし座流星群のビデオ観測において（2-1-2-1）輻射点高度による流星の出現数を修正して ZHR を算出した方法と同様である。MU レーダーでの輻射点高度による 1 時間当たりの修正流星数を  $ZHR_{MU}$  と呼ぶ。 $ZHR_{MU}$  は、観測時間で補正した 1 時間当たりの流星

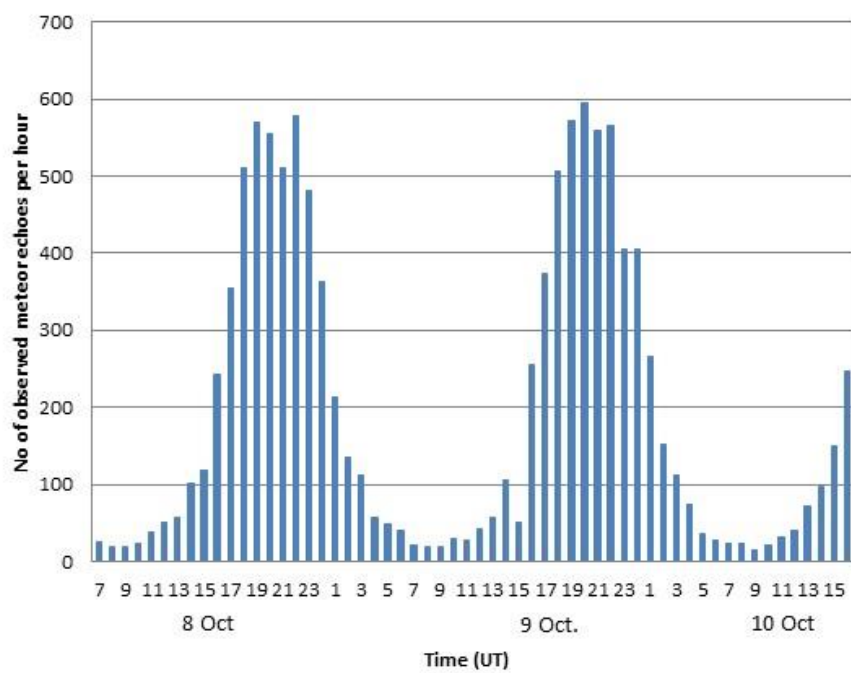


図2-8 2012年10月8日07時00分(UT)から10月10日17時00分までのMULレーダーで観測された1時間あたりの流星数の時間変化。観測されたヘッドエコーの総数は11,210個であった。Fujiwara et al.(2016)より転載

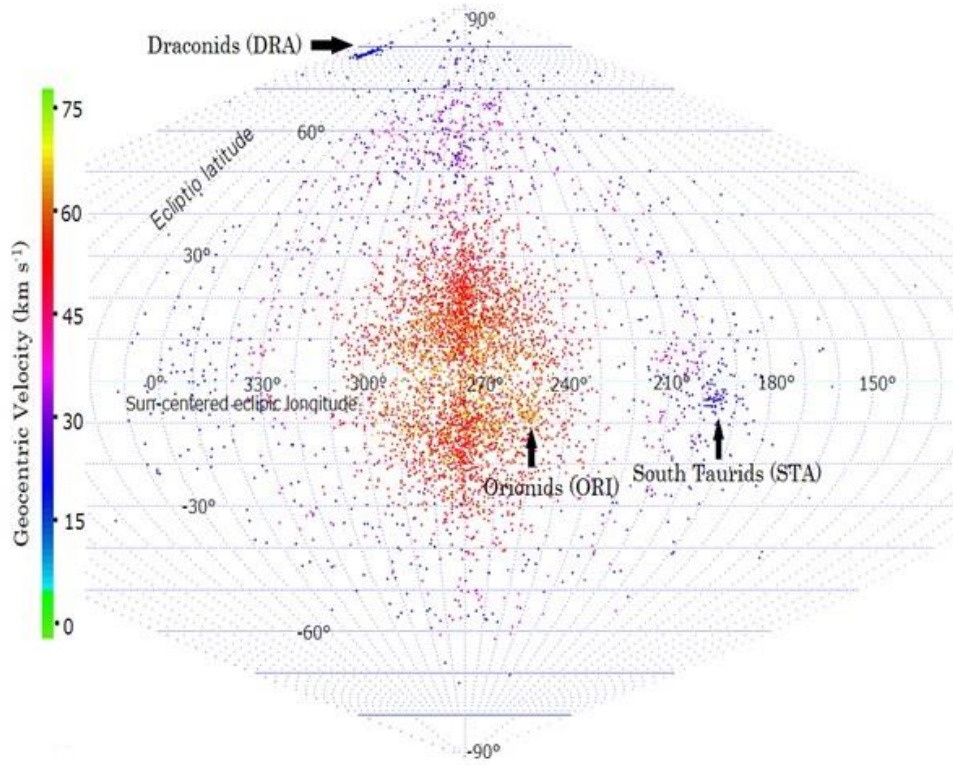


図2-9 11,210個の流星輻射点の分布. 太陽を中心とした黄経と黄緯による図にプロットされている. 地球の公転方向(apex)は、この図の黄経270° の方向である. 流星の地心速度は色で示されている. リゅう座流星群、おうし座南群とオリオン座流星群の輻射点は矢印で示されている.

Fujiwara et al.(2016)より転載

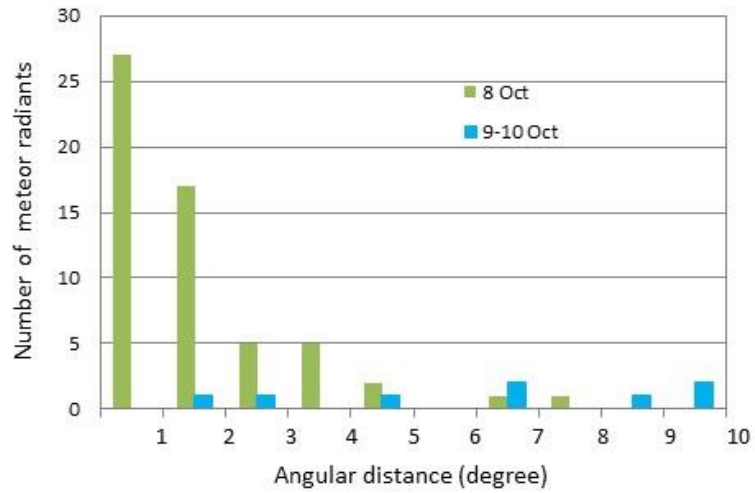


図2-10 輻射点の集団の中心からの角距離の分布. 突発出願があった10月8日(UT)とそれ以外の日(9~10日)とに分けて示している.

Fujiwara et al.(2016)より転載

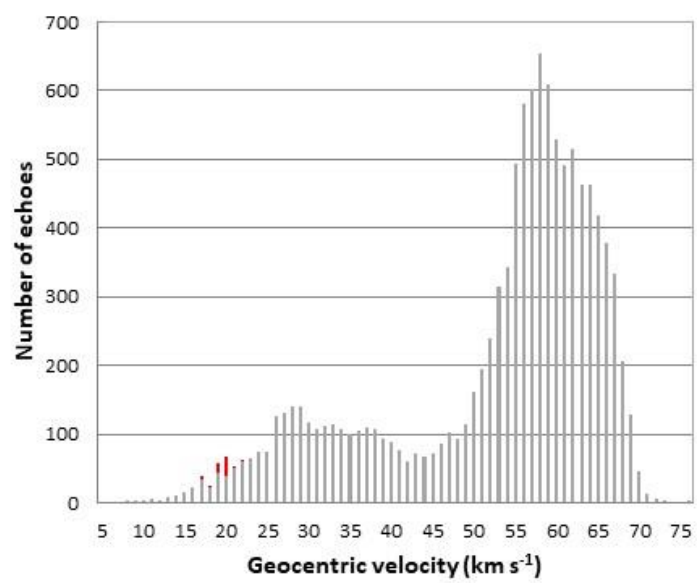


図2-11 全観測流星の1km s<sup>-1</sup>ごとの地心速度分布. リゅう座流星群流星は赤色で表示されている。  
Fujiwara et al.(2016)より転載



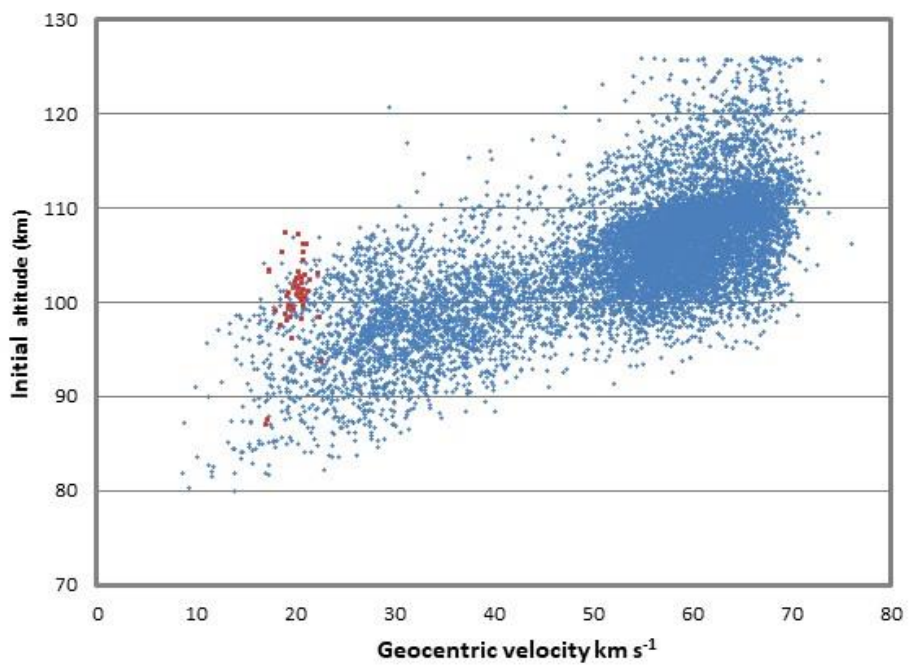


図2-12 地心速度と出現高度との散布図. リゅう座流星群流星は赤色で表示されている. Fujiwara et al.(2016)より転載

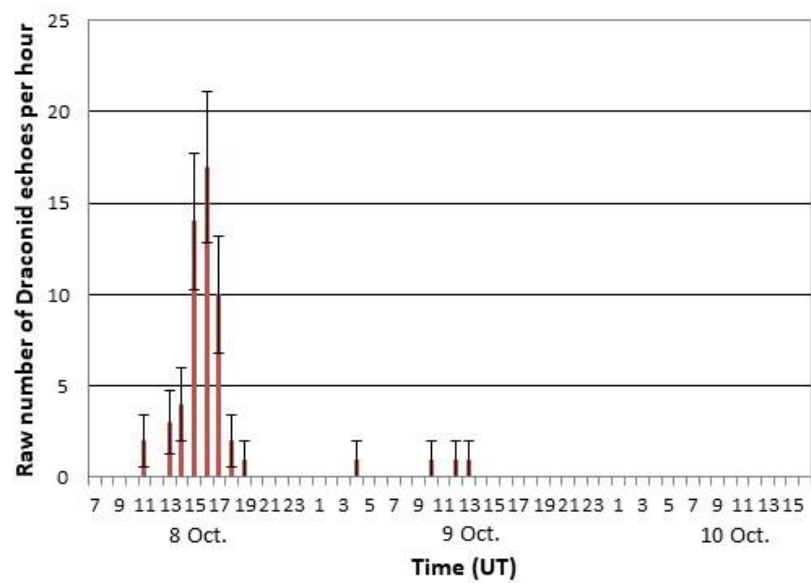


図2-13 2012年10月8日07時00分から10月10日17時00分までの1時間あたりのリゅう座流星群流星のエコー数の時間変化。リゅう座流星群流星のヘッドエコー数は全部で57個であった。Fujiwara et al.(2016)より転載

数に  $\sin^{-\gamma} h$  をかけることにより計算する (2-1-2-2 参照)。  $h$  は輻射点の仰角である。  $\gamma$  の値は、MU レーダーヘッドエコー観測でのオリオン座流星群の解析では 1.47 が用いられたが、ふたご座流星群の解析では、過修正になることを避けるために  $\gamma = 1.0$  を適用した。同じ理由でりゅう座流星群の解析にも  $\gamma = 1.0$  を適用した。

図 2-14 は、2012 年 (図の上段左) と、2011 年 (Kero et al. 2012a) (図の下段左) の 10 月 8 日 07 時 00 分から 10 月 9 日 07 時 00 分までの間の 1 時間当たりの流星数 (HR) を示している。同じ観測期間の  $ZHR_{MU}$  については、2012 年は図 2-11 の上段右に 2011 年は下段右に示している。輻射点高度は低いけれども、2012 年 10 月 8 日の 15 時 00 分から 18 時 00 分の間に活発なりゅう座流星群の活動が観測されている。図 2-15 は、20 分間隔でのりゅう座流星群の観測流星数 (有効観測時間で修正していない生データ) (図の上段) と  $ZHR_{MU}$  の値 (図の下段) を示している。りゅう座流星群の観測数は、6 以下と比較的少ないので、統計的な揺らぎは小さくなく、観測結果から活動の極大時刻を計画に決定することは容易ではないが、10 月 8 日 16 時 20 分から 17 時 40 分にかけて活動の極大が起きた可能性は極めて高い。このことは、Maslov (2011) と佐藤 (2012 脚注 2) の予報と一致しており、また IMO による眼脂観測の結果 (16 時 51 分) と CMOR の結果 (16 時 40 分; Ye et al. 2014) とも一致する。

#### 2-2-4-2 りゅう座流星群の輻射点と軌道

全観測期間中に得られた 57 個のりゅう座流星群の加重平均地心輻射点は、赤経: 262.5 度  $\pm 0.6$  度、赤緯: +55.8 度  $\pm 0.3$  度 (J2000.0 分点) で、加重平均地心速度は、20.5  $\pm 0.3$  km s<sup>-1</sup> であった。りゅう座流星群の流星体は非常にもろいので、大気中のアブレーション過程では流星体の減速を考慮しなければならない (Ye et al. 2013)。Ye et al. (2014) は、より高い高度で検出された流星は減速の影響がより少ないので、りゅう座流星群流星の速度の決定にあたっては、CMOR で検出された高い高度 (98 から 99 km) の 14 個のエコーから求めた。それに対して MU レーダーヘッドエコー観測では、流星体の速度を経路全体にわたって時間経過とともに正確に測定することができる (Kero et al. 2012b)。ヘッドエコー観測では、出現点での速度をその流星の観測速度とした (Kero et al. 2012a)。りゅう座流星群流星のほとんどのヘッドエコーは、出現高度が散在流星より高い。平均出現高度は、101.5 km で、極大時の 51 個のりゅう座流星群中で出現高度が 98 km 未満のものは 2 流星だけであった。それゆえに流星速度の決定には減速補正は行っていない。10 月 8 日 13 時から 20 時の間の 51 個のりゅう座流星群の加重平均地心輻射点の位置は、赤経: 262.5 度  $\pm 0.5$  度、赤緯: +55.8 度  $\pm 0.3$  度 (J2000.0 分点)、加重平均地心速度は、20.6  $\pm 0.3$  km s<sup>-1</sup> であった。

極大時での加重平均地心輻射点は、予報 (佐藤 2012 脚注 1) とよく一致している。しかしながら、このりゅう座流星群の活動が主として 1959 年に放出されたダストトレイルによるものなのか 1966 年に放出されたものなのか、あるいは双方による場合この二つのダストトレイルの関与の割合はいくらになるか明らかではない。この二つのダストトレイルから

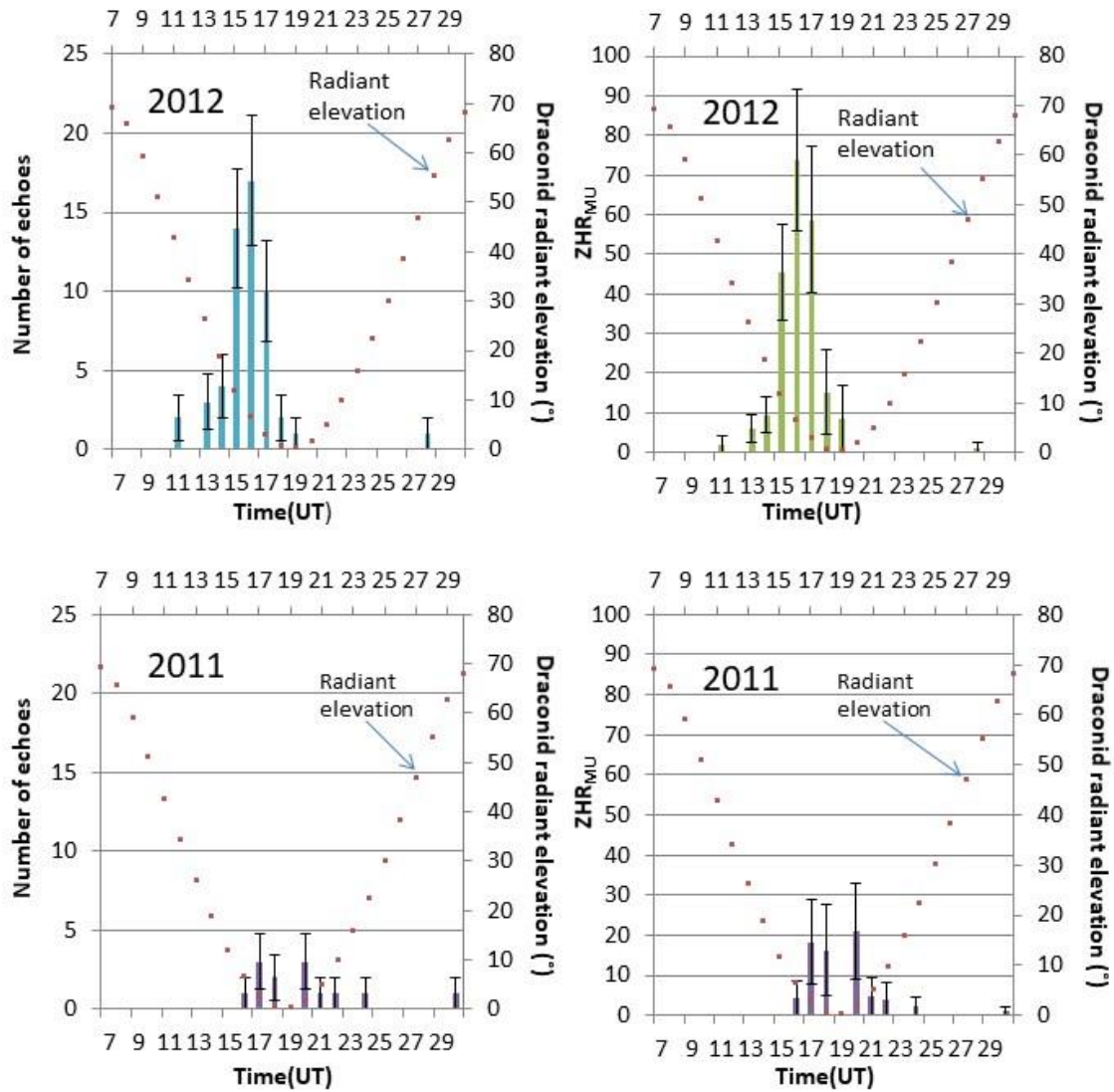


図2-14 2012年(上段左)と2011年(下段左)の10月8日07時00分(UT)から10月9日07時00分(UT)までの1時間当たりのりゅう座流星群流星の観測数. 同じ時間帯の2012年のZHR<sub>MU</sub>は上段右の図に、2011年のZHR<sub>MU</sub>は下段右の図に示されている. 図中の赤点は輻射点高度を示している. りゅう座流星群の輻射点高度は、19時(UT)付近で最も低い.  
Fujiwara et al.(2016)より転載

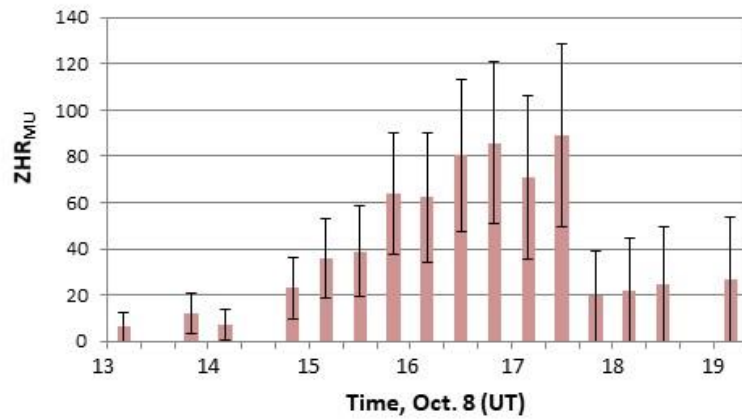
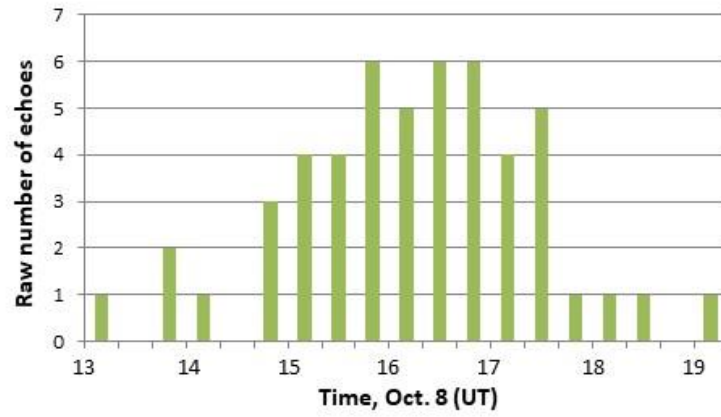


図2-15 20分間隔でのりゅう座流星群流星エコー数(上段)とZHR<sub>MU</sub>の時間変化(下段) Fujiwara et al.(2016)より転載

表 2-5 51 個の流星から求めた加重平均日心軌道 (J2000.0 分点) : 軌道半長径 ( $a$ )、  
離心率 ( $e$ )、昇交点黄経( $\Omega$ )、軌道傾斜角 ( $i$ )、近日点引数( $\omega$ )、近日点距離 ( $q$ )  
Fujiwara et al.(2016)の Table 4.を一部改変

$a$ (au)	$e$	$\Omega$ ( $^{\circ}$ )	$i$ ( $^{\circ}$ )	$\omega$ ( $^{\circ}$ )	$q$ (au)
$3.15 \pm 0.29$	$0.689 \pm 0.019$	195.606	$31.5 \pm 0.4$	$172.8 \pm 0.4$	$0.9958 \pm 0.0003$

の流星群の出現予報は、極大時刻と輻射点位置の両方ともに非常に近いからである。観測から求めた 51 個のりゅう座流星群の平均日心軌道を表 2-5 に示す。

### 2-2-4-3 レーダー散乱断面積

レーダーにとって、散乱体に関して得られる最も重要な情報の一つは、どれだけよく電波を散乱するか、である。これは観測方向に散乱される電力と入射電力密度の比であらわされ、面積の単位をもつことから、レーダー散乱断面積 (radar cross-section; 以下 RCS と表記) と呼ばれる (佐藤 2000)。すなわち、RCS は、実際の標的が散乱するのと同じ大きさの電力を受信アンテナの方向に散乱させる等方性散乱体の面積である (深尾・浜津 2005)。MU レーダーヘッドエコー観測での RCS は、レーダー方程式より次の式で表される (Kero et al. 2012b)。

$$RCS = \frac{(4\pi)^3 P_r R^4}{G_r(\theta, \varphi) G_t(\varphi, \theta) \lambda^2 P_t}, \quad (2-2)$$

ここで、 $P_r$  は受信電力、 $R$  は流星エコーの距離、 $G_t$  は送信アンテナの利得、 $G_r$  は受信アンテナの利得、 $\varphi$  は流星エコーの方位 (北から東回りで測定)、 $\theta$  は流星エコーの仰角、 $\lambda$  はレーダーの波長、 $P_t$  は送信電力である。受信電力  $P_r$  は、次の式から得られる。

$$P_r = T_{noise} k_B b_w \cdot (SNR), \quad (2-3)$$

ここで、SNR は信号対雑音比 (signal-to-noise ratio)、 $T_{noise}$  はシステムの雑音温度、 $k_B$  はボルツマン (Boltzmann) 定数 ( $= 1.38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ )、 $b_w$  は受信機帯域幅である。Kero et al. (2011, 2012b) は、MU レーダーでの RCS をどのようにして求めたかとレーダーのハードウェアの雑音と背景となる銀河雑音とを合わせた雑音温度をいかにして決定したかについて述べている。RCS は 1 平方メートルを基準にしてデシベルで表した単位で表示する (dBsm)。0 dBsm は RCS  $1\text{m}^2$  の物体からの散乱となる ( $10 \log (1\text{m}^2) = 0 \text{ dBsm}$ )。

図 2-16 は、2011 年 (赤色) と 2012 年 (緑色) に検出した流星エコー数の対数値を 1 dBsm 間隔で示している。図 2-16 からは、2011 年と 2012 年で観測時間数が異なることにより検出エコー数は異なるが、RCS の分布自体はほとんど同じであることが分かる。図 2-17 は、2011 年 (赤色) と 2012 年 (緑色) に検出したりゅう座流星群流星エコー数を 5 dBsm

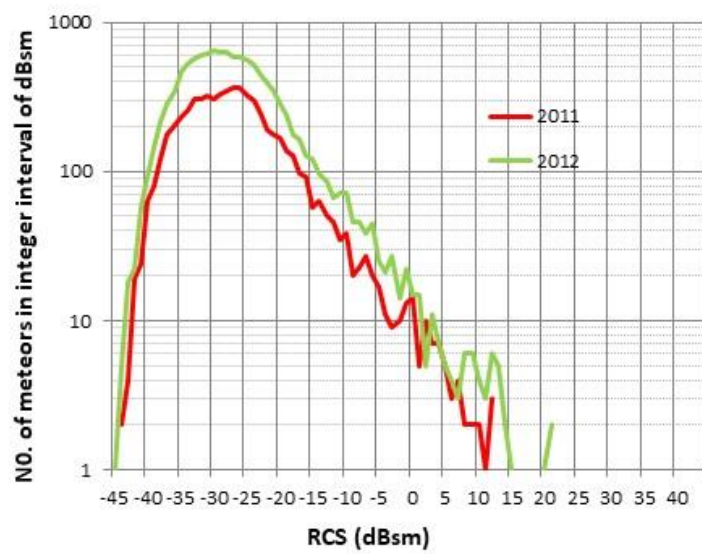


図2-16 2011年(赤)と2012年(緑)に観測した流星エコー数の対数値の1dBsm間隔での分布 Fujiwara et al.(2016)より転載

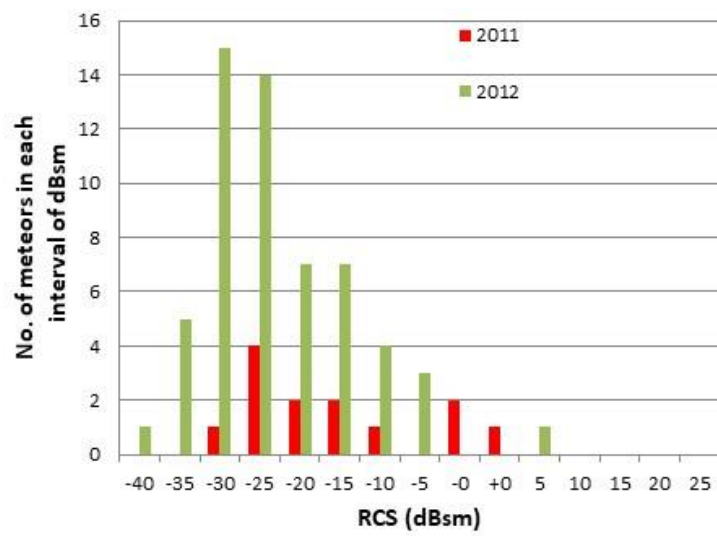


図2-17 2011年(赤)と2012年(緑)に観測したりゅう座流星群流星のエコー数の対数値の1dBsm間隔での分布  
Fujiwara et al.(2016)より転載



間隔で示している。この図から、2012年のりゅう座流星群は2011年に比べてRCSの小さい流星がより多数を占めていたことは明らかである。RCSの分布のピークは、2011年では $-20 \sim -25$  dBsmであったのに対して、2012年では $-25 \sim -30$  dBsmにピークがある。ピークの値を比較するだけでなく輻射点高度の関数として変化する流星の検出効率を考慮に入れるために、 $1/\sin$ （輻射点の仰角）で重みをつけた突発出現全体を表すRCSの平均値を求めた。平均RCSの値は、2011年は $-17.1$  dBsm、2012年は $-24.3$  dBsmであった。加えて、2011年にはRCSが $-35$  dBsmより低い流星エコーは観測されていない。

### 2-2-5 議論とサマリー

この研究では2012年の結果と2011年にKero et al.(2012a)によって得られた結果とを比較しながら進めてきた。りゅう座流星群の2011年と2012年の活動の極大期の輻射点高度は異なっているけれども、図2-14で示したように2012年の極大時の活動は $ZHR_{MU}$ の値で2011年のその約3倍であった。ただし、2011年の極大時の輻射点高度は非常に低かった（約10度）ことは注意すべきではある。CMORで決定されたZHRとの間には大きな差があるが、この研究で用いた $ZHR_{MU}$ は、単に観測された1時間あたりの流星エコー数（rate）を輻射点の高度で補正しただけであるので、CMORでのZHR（Ye et al. 2014）と直接的に比べることはできない。CMORのZHRは、レーダーで観測されたフラックスの値と質量分布指数をもとにCMORの観測限界等級が8.5等であることを使って眼視観測相当でのZHRを計算したものであるからである（Ye et al. 2014）。

流星からのヘッドエコーのRCSは、流星体の質量（ $m$ ）と速度（ $v$ ）に依存しており、RCSは、流星体の質量と速度の3乗に比例する（ $RCS \propto mv^3$ ）ことが見出されている（Close et al. 2007; Szs et al. 2008）。図2-17で示したように、2012年と2011年のりゅう座流星群のRCSの分布からは、2012年は2011年より小さいRCSの占める割合が大きい。このことは、2012年のりゅう座流星群の流星体は2011年のそれとの比較でより小さい質量のものの割合が高かったことを示している。

2012年のCMORでの観測結果での眼視観測相当（最微星6.5等）ZHRは極大時の5分間隔の観測から約9,000と決定されている（Ye et al. 2014）。他方、IMOに報告された眼視観測のZHRは2011年と同レベル（ $ZHR = 200 \sim 300$ ）であった。眼視観測よりもレーダー観測のほうがより活発な活動を捉えたことの原因として、2012年のりゅう座流星群の突発出現では、流星体が親彗星から放出されたときに眼視観測では検出できなくてレーダーでは検出できる大きさの流星体が主として地球と衝突したという強い選択効果が作用したことでYe et al.(2014)は説明している。今回の研究結果も彼らの解釈と一致する。佐藤(2012)の予報では、1966年に放出された流星体の速度は $43 \sim 51 \text{ m s}^{-1}$ と計算されている。この速度は、りゅう座流星群の過去の突発的な大出現のときのダストトレイルの流星体の放出速度がほとんどの場合に $20 \text{ m s}^{-1}$ 以下である（2011年出現：1900年放出 $8.3 \text{ m s}^{-1}$ （佐藤 2011）、1998年出現：1926年放出 $10.8 \text{ m s}^{-1}$ （Sato2003））のと比較すると極めて大きい。すでに2

章の冒頭で述べたように、この大きな放出速度からは、質量の小さな流星体の放出が予想され、MUレーダーヘッドエコー観測から得られた2012年に観測されたりゅう座流星群流星の質量分布が2011年のそれと比較して質量の小さいほうへシフトしていたことと一致する。また、観測から決定された活動の極大時刻は、これらのダストトレイルからの予報出現時刻と一致したことから、2012年のりゅう座流星群の活動は、親天体から速い速度で放出された質量の小さな流星体が主体のダストトレイルとの遭遇によって生じたものであると考えられる。以上の考察より、前節でのしし座流星群で考察したダストトレイルでの流星体の放出速度と暗い流星による流星群の活発な出現と同様に、ダストトレイル理論からの流星群の出現を考えるうえでは、親天体からの放出速度が重要であることが観測から明らかになった。眼視観測ではとらえることができない暗い(質量の小さい)流星の観測の観測が、流星群の誕生と進化を研究するうえで重要であることを強く認識するべきであると考えられる。

### 3 流星群の活動から推定する親天体の過去の活動履歴

彗星と小惑星は、その天体が質量を放出しているかどうかで区分されてきた。質量を放出しているものを彗星、それが確認できずに恒星状になっているものを小惑星と定義してきた(序章参照)。しかしながら揮発成分を昇華しつつして非揮発成分だけが残された枯渇彗星の存在もかねてから指摘されてきた(Weissman et al. 2002)。現在の地上からの観測技術からは、それが枯渇彗星なのか小惑星なのかの見分けはつかない。また、これらの天体は公転軌道の位置により常時観測できるわけではないので、彗星から枯渇彗星への変遷を確認するのは困難であった。本研究では、これまで研究されていなかったこの彗星の物理的な変遷を流星群の活動という視点から解明する新しい手法で取り組んだ。取り上げた流星群はほうおう座流星群である。

#### 3-1 序論

ほうおう座流星群は、1956年12月に突発的な出現が観測された(Huruhata & Nakamura 1957, Ridley 1957, Ridley 1962, Shain 1957, Venter 1957, Weis 1958)それまでには知られていなかった新しい流星群であった。しかしながら、それ以降は、活発な流星群活動の観測報告はなかった。Blanpain 彗星が親天体の候補と指摘された(Ridley 1957)が、同彗星も1819年に発見時の観測があるのみで、その後の近日点回帰では観測がなく行方不明となっていた。2005年になって、2003年に発見された小惑星2003 WY<sub>25</sub>とBlanpain 彗星との同定が指摘された(Foglia et al. 2005)。1819年の位置観測と2003年の位置観測とを用いることで、Blanpain 彗星の正確な軌道の計算が行われた。これにより、この彗星のダストトレイルからの流星群の出現をモデル粒子での計算により検証することが可能となった。その結果、1956年の大出現が、母天体が18世紀半ばから19世紀初頭にかけて放出されたダストによるものであることが解明された(Watanabe et al. 2005)。また、1970年、80年代にほうおう座流星群の非常に弱い活動が報告されてはいるが(Wood 1984)、ほうおう座流星群の明確な活動が捉えられなかったことは、1956年を除き地球軌道に0.003 au以内に接近するダストトレイルはなかったことで説明できることが分かった(Watanabe et al. 2005)。

Jenniskén & Lyytinen(2005)は、同様の計算に基づき1819年に放出されたダストトレイルが1956年のほうおう座流星群の突発出現をもたらしたことを示した。彼らは、Blanpain 彗星が1819年かあるいはその少し前の近日点回帰のときに大きく分裂したこと、また、それがもとで1819年に活発な彗星活動が観測されたと結論付けた。そのうえで、彼らは1956年のほうおう座流星群の流星体は、Blanpain 彗星の分裂により生成されたこと、そして小惑星2003 WY<sub>25</sub>は、この彗星の核の分裂破片の最大のものであると考えた。

Jewits(2006)は、2003年の観測から小惑星2003 WY<sub>25</sub>は非常に薄いコマを持っていることを見出した。彼は、この天体が弱いながらも彗星としての活動を指し示した。2013年7月4日にPan-STARRS(Panoramic Survey Telescope and Rapid Response system)サーベイで光度20等で発見された彗星が、2013 WY<sub>25</sub>と同定され、2013年にも彗星として

観測された。これらの 1819/1820 年、2003 年、2013 年の観測を結ぶ軌道が計算され、Blanpain 彗星は、周期彗星 289P として登録された。

Sato & Watanabe (2010)は、母天体が見失われていた時期である 20 世紀初頭に母天体が彗星としての活動がありダストを放出していたという仮定の下で、Nakano (2005)<sup>7</sup>が計算した軌道を用いてダストトレイルによるモデル計算を行った。彼らは、その時期に放出されたダストトレイルが 2014 年 12 月に地球に接近して流星群の出現をもたらす可能性があることを指摘した。

それゆえに、2014 年 12 月に流星群が出現するか否かは、過去の親天体の活動、特に母天体自体が見失われていた 20 世紀初頭の彗星としての活動を推定する鍵となりうる (Sato & Watanabe 2010)。これは、流星群の親天体の過去の活動を調べる新しい手法である。Sato & Watanabe (2010) は、流星群の極大が 12 月 2 日 00 時 UT 周辺で起こることを予報した。そこで著者らは観測チームを組織してほうおう座流星群の光学観測が可能であると期待したアメリカ東海岸のノースカロライナ州に遠征した。この章では、観測結果と予報との比較、さらにそこから推定される親天体 289P/Blanpain 彗星の活動履歴について述べる。

## 3-2 観測

### 3-2-1 遠征 (Expedition)

ほうおう座流星群の活動の予報極大時刻である 2014 年 12 月 2 日 0 時 UT 周辺で予報輻射点からの流星を観測する条件がよい、すなわち真夜中に輻射点在天頂付近を通過する観測場所は、大西洋上から南アメリカ大陸東海岸であった。遠征するにあたっては、次の要件を観測場所の選択上考慮した。(1)流星群活動の極大時の太陽の地平線下高度、(2)薄明終了時刻、(3)極大時の輻射点高度、(4)観測地の天候、(5)観測地の空の暗さである。さらに次の条件には、より高い優先度を与えた。日本からの観測地へのアクセスの程度(良さ)と観測地での設備、特に既設電源が利用可能かどうかである。これらの要件をもとに、スペイン領カナリー諸島とアメリカ合衆国東海岸が遠征先の候補地となった。交通アクセスが容易であることと事前に観測地の下見が可能であることからアメリカ東海岸を遠征先とした。より南に行くにしたがって輻射点高度は高くなり、より東に行けば観測時間が長くなるという利点があった。最終的に、予報極大時刻を考慮して夕方の薄明終了時刻が早い、北米大陸でより東に位置するバージニア州とノースカロライナ州の大西洋沿岸地域を候補地とした。さらに加えて、これらの地域の天候の統計情報も晴天の確率が高いことを示していた。2014 年 11 月に現地の下見を行い、3 か所の観測候補地を選定した。候補地の中で一番南に位置していたことと観測日の当日の天気予報が最も良かったので、ノースカロライナ州 Sandy Point のキャンプ場を観測当日の朝に観測場所として選択した(図 3-1)。観測地の緯度・経度は、それぞれ西経 76 度 00 分 38.2 秒、北緯 36 度 32 分 50.5 秒、海拔はほぼ 0m であっ

---

<sup>7</sup> Nakano Note No.1168 (<http://WWW.oaa.gr.jp/~oaacs/nk/nk1168.html>)

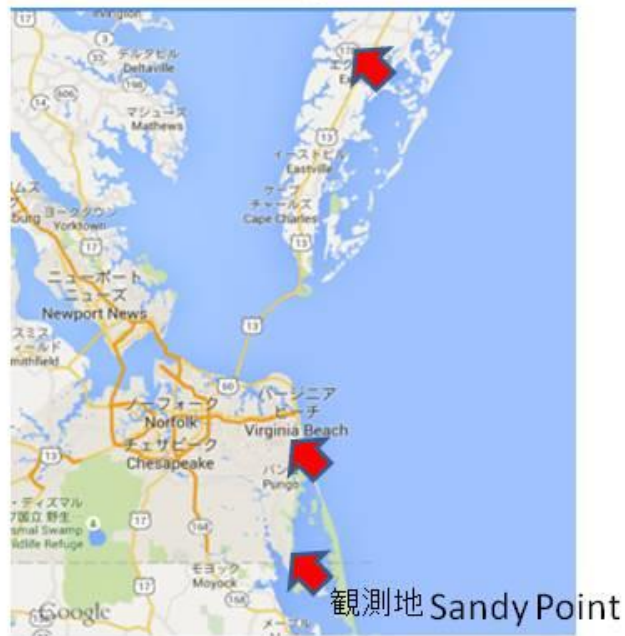


図3-1 観測地 アメリカ合衆国ノースカロライナ州Sandy Point 三ヶ所の候補地の中で観測当日の天気予報が最も良かった一番南のSandy Pointで観測を行った。

た。

### 3-2-2 観測機材

観測機材の観測視野 (FOV)、観測方向、観測面積、カメラの感度の一覧を表 3-1 に示す。カメラ A~D は、ワテック社の高感度小型 1/2 サイズ CCD カメラで CS マウントのレンズを装着している。E と F は、第 2 世代のイメージ・インテンシファイアー (V3287P : 浜松フोटニック社と XX1470 : DHT 社) をビデオカメラに装着したシステムである。焦点距離 85mm (カメラ E)、28mm (カメラ D) の 35mm 版のレンズを使用して、視野はそれぞれ 17 度と 43 度であった。カメラ E の恒星での最微光星は約 8 等であった。A から F のビデオは、NTSC 規格 (1 秒あたり 30 フレーム、2 フィールドで 1 フレームを構成) で撮影した。G は、ソニー社製のデジタル一眼レフカメラ (Digital Single-Lens Reflex camera DSLR) で、35mm フルサイズ CMOS センサーより最高 ISO 感度 ISO409600 の高感度によるハイビジョン動画撮影が可能である。今回の観測では、月光によるかぶりを軽減するために、ISO 感度 32000 で、解像度は、1920×1080、フレームレートは、60i (1 秒あたり 30 フレーム、インターレース) のハイビジョンモードで撮影された。H と I は、リコー製の APS-C サイズの CMOS を用いたデジタル一眼レフカメラ (タイプ K3 と K5) で、ISO 感度 12800 で静止画を記録した。

表 3-1 観測機材と観測方向 Fujiwara et al.(2017)の Table 1.を一部改変

機材 名称	観測カメラ 名称	レンズ 焦点距離	観測視野 <sup>a</sup> (FOV) 水平×垂直 (°)	観測 方向 (仰角, 方位 <sup>b</sup> )	観測視野 面積 km <sup>2</sup>	撮影限界 等級 (恒星)	位置測定 精度 (°)
A~I							
A	Watec902H2U-6 mm lens		57 x 43	47, 28	16000	5.5	0.02
B	Watec100N-6 mm lens		57 x 43	79, 335	5800	5.4	0.02
C	Watec100N-12 mm lens		31 x 23	36, 200	7700	5.8	0.01
D	Watec100N-12 mm lens		31 x 23	34, 147	9100	6.3	0.01
E	I.I.-85 mm lens		φ17		2000-4100	7.8	0.02
F	I.I.-28 mm lens		φ43		11900-74100	5.5	0.06
G	α7s-24 mm lens		73 x 53	Southeast	111800	5.5	0.01
H	Pentax K3-4.5 mm lens		all sky	天頂			0.04
I	Pentax K5-18 mm lens		67 x 47	89, 185	7300		0.06

(注)

<sup>a</sup> 観測視野で φ は円径視野の直径を表す。

<sup>b</sup> 観測方向の方位は北から東回り、度で表示している。

カメラ A から D とカメラ G から I は、表 3-1 に示す方向に向けたが、カメラ G は、観測方向を観測時間中に数回わずかに変えた。カメラ E は+4 等より暗い群流星の活動を調べることを目的とした。そのためにカメラの FOV が狭くなっており、輻射点から FOV が離れると微光の短経路の流星について群の帰属判定が難しくなることを防ぐために、輻射点から観測視野が離れすぎないように約 60 分ごとに観測視野を動かした。カメラ F も同様に輻射点周辺の群流星を観測対象とするため輻射点が入るように FOV を動かした。カメラ H は、全周魚眼レンズで明るい群流星の活動を捉える事を目的に天頂方向に向けられた。カメラ B と I は、天頂方向に向け、フラックスを測定することを目的とした。カメラ C と D は、輻射点の南中前後を輻射点からの同じ離角で観測できるように、視野が子午線を挟んで連続する方向に向けられた。カメラ A は、月からの光の影響を最小にできるように月からの離角が大きい方向に向けられた。カメラ G は、感度が高いこととレンズの広画角であることを活用して低仰角で広い観測面積カバーすることを目的とした。

表 3-1 に示している観測視野面積は、流星の出現高度 80km を仮定して計算した。80km という値は、Molau & SonotaCo (2008) が同時観測結果から得た観測速度 (infinity velocity) と発光点高度の関係を示す実験式(1)にほうおう座流星群の予報観測速度 (infinity velocity)  $14.8 \text{ km s}^{-1}$  を適用したものである。ビデオカメラの感度は、恒星の撮影限界等級で示されている。カメラ E と F は観測視野が固定されていないので、その観測面積の最大値と最小値が表 3-1 に示されている。

表 3-2 観測時間帯・有効観測時間・全観測流星数・ほうおう座流星群観測流星数

Fujiwara et al.(2017)の Table 2.を一部改変

観測機材名称	観測時間帯 (UT)	有効観測時間 <sup>a</sup>	全観測流星数	ほうおう座流星群数
A	22:36:41-04:04:20	325.5	25	6
B	22:54:05-04:00:06	285.3	9	4
C	22:32:37-04:10:00	337.4	10	1
D	22:15:03-04:00:39	345.0	15	1
E	22:41:59-04:13:35	356.1	18	3
F	22:42:35-04:08:57	324.9	16	6
G	22:44:57-03:54:30	284.4	49	9
H	23:01:00-04:09:30	275	17	8
I	22:58:40-04:04:39	258.2	11	4

(注)

<sup>a</sup> 単位は分

### 3-2-3 観測

2014年12月1日の観測地での日没は、現地時間（Easter Standard Time: EST）で16時49分（21時49分UT）、薄明（太陽高度-12度）終了時刻は、現地時間（EST）で17時49分（22時49分UT）であった。観測は、薄明終了時刻前後から始めた。観測開始時から現地時間（EST）で23時（12月2日04時UT）までは快晴であった。しかしながら、現地時刻（EST）23時頃から北の方向より急速に曇り出し23時20分には全天雲に覆われ、それ以後は明け方まで状況は変わらなかった。この天候の悪化により、すべての観測は23時15分ESTまでで終了した。観測時間中、月齢9の月が出ていた。ビデオカメラは、直接月が視野内に入らないように撮影された。デジタル一眼レフカメラでは、短時間露出（H:3秒、I:2秒）を行うことにより月光の影響を軽減するようにした。

ビデオカメラのA、B、Eの映像は、DVテープに記録された。ビデオカメラFの映像は、ビデオカメラ内蔵のハードディスクに記録された。ビデオカメラCとDのビデオ信号は、その場でパソコンに取り込まれて、ソフトウェア UFOCaptureV2（以下、UC2と略す）（SonotaCo 2009）により流星の自動検出を行った。UC2は、入力映像の変化を検出して、検出の数秒前（今回は1秒）からハードディスクに録画するタイムシフト動体検出動画キャプチャーソフトウェアである。対象の移動速度を計測して、これが一定以下の対象（例：人工衛星）は検出対象としない機能や、背景の空の明るさより暗い鳥や虫の動きを検出しない設定など、流星観測を支援するオプション機能も有している。流星の画像データ等はパソコンのハードディスクに記録した。カメラGは、ハイビジョン動画をAVCHD録画方式（1080、60i）でSDカードに記録した。カメラHとIは、それぞれ露出時間は、3秒と2秒で、高速連射モードを使用して連続して撮影し画像を記録した。カメラHでは、1分間に18コマ又は19コマ（1分ごとに交互になる）、カメラIでは1分間に28コマが撮像された。

それぞれの機材の観測時間帯、有効観測時間、観測された流星数は表3-2に示した。有効観測時間は、ビデオテープの取り換え、DSLRでの露出時間の隙間で記録できなかったロス時間を除いたものである。

### 3-2-4 解析

カメラA、B、E、F、Gの録画データは、ビデオ信号を再生して、それをデジタル化してパソコンに取り込んだ。そして、UFOCaptureHD2ソフトウェア（SonotaCo 2016）で処理することにより流星の自動検出を行った。それに加えて、自動検出で漏らした流星を検出するために、モニターに画像を再生することにより肉眼で流星の検出も行った。この作業は、二度実施した。検出された流星は、UFOAnalyzerV2（以下、UA2と略す）（SonotaCo 2009, 2016）を用いて位置と光度の測定を行った。UA2は、SKY2000 Master Catalog Version4（Myers et al. 2002）を測定位置と測光の手順で利用している。画像上のxとy座標が測定され、赤経と赤緯に変換される。ビデオデータの詳細な測定手法は、UA2のユーザーマニ



ュアル<sup>8</sup>に詳細に書かれている。位置測定精度は、表 3-1 に示している。カメラ F の位置測定精度が低いのは、イメージ・インテンシファイアーと広角レンズとを組み合わせたからである。測光の誤差は、カメラ A、B、C、D、G については 0.2 等以下で、カメラ E と F は、約 0.3 等であった。

デジタル一眼レフカメラ H と I の静止画像からは、画像を肉眼でチェックすることにより流星を検出した。このチェックは、見落としを避けるために 2 回実施した。画像処理ソフトのマカリ (Makali'i)<sup>9</sup>を用いて位置測定と光度測定を行った。最初に、輝度分布の重心位置を計算することにより画像上の x と y 座標を決定した。次に、その値を使って恒星の位置をもとに標準座標法 (長谷川 2002) を用いて赤経と赤緯に変換した。背景の恒星を用いた測光もそのときに同時に行った。位置測定誤差は、カメラ H が 0.04 度、カメラ I が 0.06 度であった。カメラ H と I の「見かけ上の明るさ」の測定誤差は 0.2 等以下である。静止画像の背景に写っている恒星の光は、2 秒あるいは 3 秒間蓄積されており、これは画面上を移動する流星より長く画素上に蓄積されているので、直接、画面上での恒星と流星の明るさを比較することによっては流星の等級を決定することができない。流星の角速度は、静止画像上での「見かけの明るさ」に影響を与える。しかしながら、DSLR のみで撮影された流星の角速度を測定することはできない。それゆえに、最初に、ビデオカメラと DSLR (カメラ H) の両方で同時に撮影された 7 個の「基準流星」を用いて、ビデオで測定した流星光度と DSLR からの「見かけの明るさ」との関係式を求めた。そして、この関係式を用いることにより DSLR の「見かけの明るさ」から流星の光度を決定した。7 個の「基準流星」の角速度は、 $2.0^{\circ} \text{ s}^{-1}$  から  $17.0^{\circ} \text{ s}^{-1}$  であった。この方法により決定された光度の標準偏差は 0.6 等であったことから、今回の観測システムにおける角速度による誤差は、1 等を超えてはおらず、流星の光度分布の結果に大きな影響は及ぼしてはいないと考えている。

### 3-2-5 群流星の判定

位置測定された流星の経路は、経路が直線に表示されることから中心投影法で書かれた星図に記入した。記入された流星経路に基づき、最初に、経路長、輻射点までの角距離、角速度 (ビデオ観測の場合) を考慮して明らかにほうおう座流星群の群流星でないものを除外した。その上で、経路の逆延長線が予報輻射点から 5 度以内を通過する流星を群流星の候補とした。角距離 5 度以内という基準は、群流星かどうかを判定されるのに一般的に用いられているものである (Nagawasa & Kawagoe 1987; Brown et al. 2002)。ほうおう座流星群流星の地心速度は大変遅いので、地球の引力により経路が軌道の下方に向かうため視輻射点位置は、地心輻射点より天頂方向にオフセットされた位置になる (天頂引力)。Sato and Watanabe(2010)による予報輻射点は、地心輻射点であるため、観測地と観測時間における

---

<sup>8</sup> <http://sonotaco.com/soft/download/UA2Manual.pdf>

<sup>9</sup> <http://makalii.mtk.nao.ac.jp/>

地球の引力と自転の効果を考慮した輻射点 (= 視輻射点) 位置で群流星かどうかを判断することが必要である。予報視輻射点の位置は、12月1日23時03分(UT)から12月2日01時12分(UT)にかけて地球に大接近する5つのダストトレイルの予報を基に、地心輻射点位置：赤経 = 8.0度、赤緯 = -27.5度、地心速度 = 9.8 km s<sup>-1</sup>を用いて計算した。今回の観測地での12月2日0時(UT)では、天頂引力は約12度に達する。そこで群流星の候補の個々の流星出現時刻における視輻射点の位置を計算した。計算には、天頂引力に加えて日周光行差の補正も行われている。そして候補の流星の流星経路を逆延長した線と計算された視輻射点との最短の角距離を計算した。これらの29個の群候補の流星は、その経路の逆延長線が予報輻射点からの最短角距離が2.5度以内にあることから(図3-2)、ほうおう座流星群の流星と判定した。この結果からも、角距離5度がこの研究での群流星判定基準として妥当であったことが分かる。ほうおう座流星群の速度がたいへん遅いことによる輻射点の広がりについては、3-4で詳細に議論する。

### 3-3 観測結果

#### 3-3-1 活動の時間変化

図3-3の左の図は、2014年12月1日22時15分UTから12月2日4時13分UTまでの観測で得られた流星数の時間変化を示している。図中の流星数は、有効観測時間で補正した1時間当たりのレート(Hourly Rate: HR)を示している。23時00分UTから04時00分UTでの1時間当たりの各カメラの平均有効観測時間は約56分であった。

ほうおう座流星群の天頂1時間流星数(ZHR)は、2章(2-1-2-2)のしし座流星群のビデオ観測と同様の方法により求めた。 $\gamma$ の値は、過修正を避けることと議論の単純化するために $\gamma = 1.0$ を適用した。輻射点の高度は、Sato & Watanabe (2010)の予報地心輻射点を観測時間帯の中央時刻で視輻射点に変換したもの(3-2-5参照)から算出した。ZHRの時間変化は図3-3の右の図に示している。

図3-3から、ほうおう座流星群は、1956年の出現に匹敵するような活発な流星群活動がなかったことは明らかである。観測されたほうおう座流星群の流星の数は、群流星以外の流星数より少なかった。また、それぞれの観測機材ごとの群流星の数が少ないことにより、活動の極大時刻をこの結果から決定することは難しい。

ほうおう座流星群の活動の全般的な時間変化を求めるために、すべてのカメラでの観測結果を足し合わせるにより流星数を求めた。その結果は、図3-4に示している。ここでは、他の観測機材と重複して観測していても流星数は一つとしてのみカウントしている。ほうおう座流星群については、ZHRを求め、図3-4に赤棒で併せて示している。ほうおう座流星の群流星のZHRは、02時00分UTから03時00分UTに最大となっているが、01時00分UTから02時00分UTのZHRとの差は小さい。前述のように、22時00分UTから23時00分UTの実効観測時間が少ないことを考慮に入れても、ほうおう座流星群は22時30分UT以前からすでに活動が始まっている。図3-4は、01時00分UTから03時

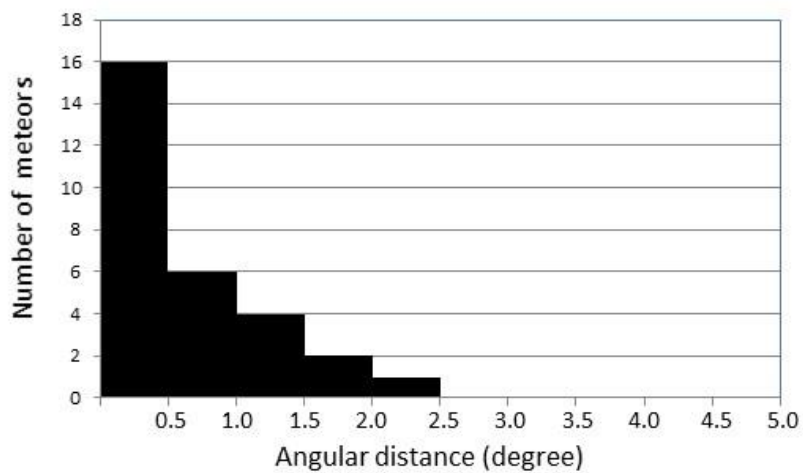


図3-2 ほうおう座流星群候補流星の経路の逆延長と視輻射点との角距離の分布. Fujiwara et al.(2017)より転載

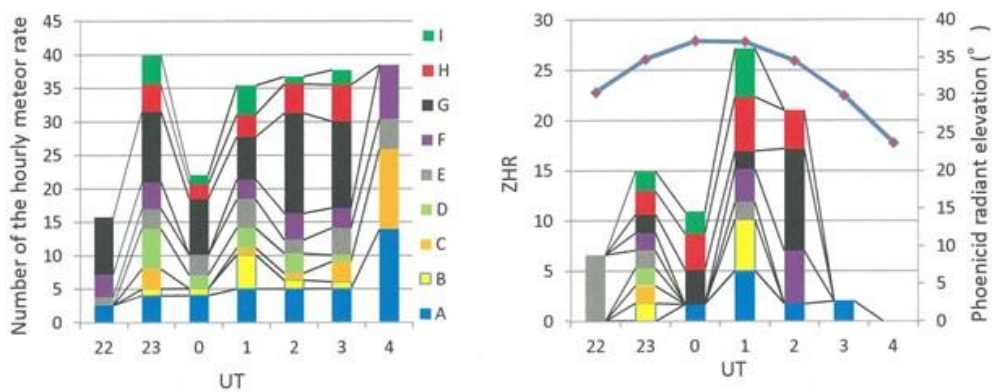


図3-3 1時間単位での流星数の時間変化 AからIまでのすべてのカメラからの観測結果が足しあわされている。左の図は、観測結果を有効観測時間で補正した1時間当たりの流星数(HR)で示している。右の図は、ほうおう座流星群の天頂1時間流星数(ZHR)の時間変化を示している。右の図の曲線は、ほうおう座流星群の輻射点高度を表している。AからIは、表3-1のカメラのIDに対応している。Fujiwara et al.(2017)より転載

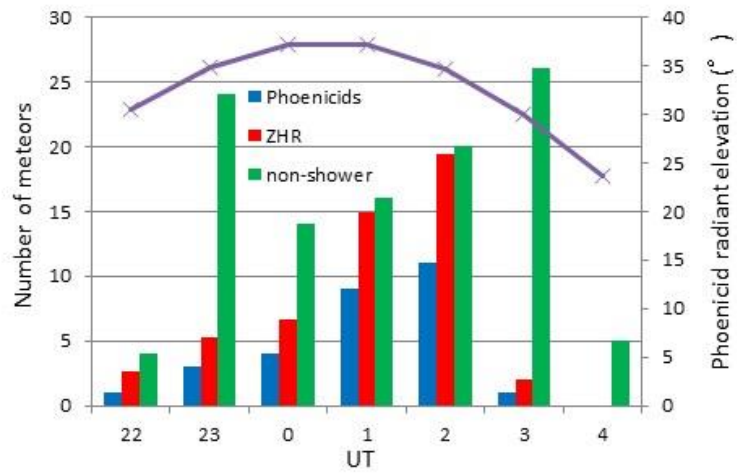


図3-4 重複観測分を除いた流星数の時間変化 青は、ほうおう座流星群流星の観測数、赤は、ほうおう座流星群のZHRを示す。緑は、ほうおう座流星群流星以外の流星の観測数を示している。紫の曲線は、ほうおう座流星群の輻射点高度を表している。Fujiwara et al.(2017)より転載

00分 UT にかけてゆるやかな活動のピークがあり、03時00分 UT 以降に急激に活動が低下したことを示している。この統合した ZHR の時間変化は、流星数が少ないことによる統計的なゆらぎを考慮すれば、個々のカメラでの観測結果と一致していないとはいえない。

### 3-3-2 光度分布

流星の光度決定の誤差については、3-2-4 で議論した静止画のみの画像から決定された流星では、0.6 等程度で小さくはないが、見かけの流星光度の大まかな分布を得ることができた。流星の光度分布は、流星群中の流星体の質量分布と密接に関連しているので重要である。29 個の群流星と 109 個の群以外の流星（散在流星）の光度分布を表 3-3 に示す。-2 等以上のほうおう座流星群流星が 4 個捉えられているのに対して群流星以外では-2 等以上の明るい流星は 1 個も捉えられていない。加えて、全天カメラ（カメラ H）では、全観測流星数の 47% が群流星であった。これらのことから、ほうおう座流星群流星は散在流星よりも明るい流星の割合が高いことは明らかである。

3-2-2 で述べたように、カメラ E は、イメージ・インテンシファイアーと 85mmF1.2 の明るい準望遠レンズで構成されておりワテックの CCD カメラでは捉える事の出来ない輻射点周辺での暗い流星（+4 等より暗い）の観測を目的とした。表 3-3 では、カメラ E での光度分布も示している。群流星以外では、+5 等と +6 等の流星をそれぞれ 5 個、4 個捉えている。そのような暗い流星は、ほうおう座流星群の群流星では観測されなかった。カメラ E の観測領域は狭く、また多くの流星が検出できてはいないのではあるが、観測から得られた光度分布からは、ほうおう座流星群での主たる活動は 4 等以上の流星あったことを示している。観測データの光度分布は、観測限界等級の異なるものや FOV の広さの違う観測装置のものを一括して含んでおり、また、群流星の数が少なかったので、光度関数は決定できなかった。

### 3-3-3 輻射点

ほうおう座流星群の輻射点は、表 3-4 に示しているように 6 個の観測時間帯に区切って決定した。すべての観測は 1 点からの観測で行われた。そのため、1 点観測からの輻射点の決定として用いられる長沢（1978）の方法で輻射点を決定した。3-2-5 で議論したように、ほうおう座流星群流星の地心速度は  $9.8 \text{ km s}^{-1}$  と大変遅い。したがって、視輻射点は、天頂引力の影響を強く受け、その結果として、流星の出現時刻により視輻射点位置は大きく変化する。それゆえに、観測時間帯を 6 個に区切った。その上で各観測時間帯の中央時刻における予報視輻射点位置と観測結果とを比較した。視輻射点の位置は、地球に特に接近する 5 つのダストトレイルの地心輻射点の平均値の赤経 =  $8.0^\circ$ 、赤緯 =  $-27.5^\circ$ 、地心速度 =  $9.8 \text{ km s}^{-1}$  から計算した。表 3-4 で示すよう、観測輻射点の位置と予報輻射点の位置との角距離は、最大で  $1.5^\circ$  以内、平均で  $1.0^\circ$  以内であった。また、輻射点の広がり、最大  $1.7^\circ$ 、平均で  $0.9^\circ$  であった。今回の観測で求めたほうおう座流星群

表 3-3 ほうおう座流星群 (Phoenicids) と群流星以外の光度分布 Fujiwara et al.(2017)の Table 3.を一部改変

光度	流星数											合計数
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	
Phoenicids	1	1	2	2	0	2	10	5	6	0	0	29
Non-Phoenicids	0	0	0	3	5	6	23	38	25	5	4	109
Phoenicids (H) <sup>a</sup>	1	1	2	2	0	2	0	0	0	0	0	8
Non-Phoenicids (H) <sup>a</sup>	0	0	0	3	5	1	0	0	0	0	0	9
Phoenicids (E) <sup>b</sup>	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	3
Non-Phoenicids (E) <sup>b</sup>	0	0	0	0	0	1	1	1	3	5	4	15

(注)

<sup>a</sup>, <sup>b</sup> (H)<sup>a</sup> と (E)<sup>b</sup> は、それぞれカメラ H と E で観測された流星数を示している

の輻射点は、コンパクトにまとまっており、かつ予報値とよい一致をみた。

### 3-4 議論

今回の観測からほうおう座流星群の流星の活動があったことは明白であるが、約 5 時間で 29 個の群流星が観測されたのみで、大きな活動やピークは見られなかった。この弱い活動は、観測を開始した 12 月 1 日 22 時 30 分 UT にはすでに始まっていた。そして、12 月 2 日 01 時 00 分 UT から 03 時 00 分 UT の間にブロードなピークが観測された。最後の群流星は、03 時 02 分 10 秒に観測された。Sato & Watanabe (2010) は、1909 年から 1930 年に放出されたダストトレイルが 12 月 1 日 23 時 16 分 UT から 2 日 1 時 20 分 UT の間に地球に 0.001 au 以内に接近することを予報した。観測で捉えたブロードな極大時刻はこの予報よりわずかに遅れている。しかしながら、流星群の軌道傾斜角が小さいためにダストトレイルが地球と接近している期間はより長くなることは十分ありうる。それゆえに、これらの地球に非常に接近するダストトレイルからのほうおう座流星群の流星を観測したものと結論できる。なお、今回の観測を開始した時間 (12 月 1 日 22 時 30 分 UT) より前の時間にほうおう座流星群の活発な活動を観測したという報告は他の地点の観測でもない (Molau 2015)。

観測から求めた輻射点の位置の予報との差は、最大で角距離  $1.5^\circ$ 、平均で  $1.0^\circ$  以内とよく一致している。また、6 個の観測時間帯での輻射点の広がり、最大で  $1.7^\circ$ 、平均で  $0.8^\circ$  と小さい。ほうおう座流星群は地球の進行方向の後ろから地球に衝突してくる軌道であり、その地心速度は大変遅い。このような地心速度が非常に遅い流星群の地心輻射点の広がり、その流星群 (stream) 内での流星体の軌道のばらつきにより大きく影響を受ける。流星体の軌道のばらつきが比較的小さい時でも地心輻射点は大きく広がる (Kresák 1968;

表 3-4 予報輻射点と観測輻射点との比較\* Fujiwara et al.(2017)の Table 4 を一部改変

No.	観測時間帯		予報輻射点			観測輻射点			群流星数
	中央時刻 (UT)	観測時間 (分)	赤経 (°)	赤緯 (°)	輻射点 高度 (°)	赤経 (°)	赤緯 (°)	輻射点の 広がり (°)	
1	23.72611	12.43	6.2	-15.9	35.6	6.2	-16.4	0.1	3
2	0.614861	37.95	8.8	-16.0	37.3	7.5	-15.2	1.1	4
3	1.295278	24.00	10.7	-16	37.3	10.1	-16.9	0.8	4
4	1.683194	17.58	11.7	-16.1	36.8	11.5	-17.3	0.3	5
5	2.231111	20.57	13.2	-16.1	35.5	13.1	-16.7	1.7	5
6	2.800417	28.28	14.8	-16.1	33.4	14.5	-16.9	0.7	7

\*観測時間帯の中央時刻は時 (hours) (UT) で表している。観測時間は観測時間帯での観測継続時間を分 (minutes) で示している。輻射点の赤経と赤緯はそれぞれ視輻射点の位置で示している。

Kresák & Porubčan 1970; Sato & Watanabe 2014)。もし流星群の活動が、ダストトレイルによるものならば、それに属する流星体の軌道のばらつきはたいへん小さいはずである。したがってその地心輻射点の広がり、低い速度による影響を受けるとしても大きくは広がらないはずである。観測から得た輻射点の位置が予報とよく一致したこととその広がり、小さかったこととの2点は、今回の活動が予報のとおり 20 世紀初頭に放出されて形成されたダストトレイルとの遭遇で起こったことを強く示唆するものである。さらに加えて、観測された群流星が、主として+4 等より明るいものであったことは、予報されていたダストトレイルに属する流星体が、親彗星からの放出速度が  $3 \text{ km s}^{-1}$  以下の低速であったことによる比較的大きな質量であったこととも一致する。

Sato & Watanabe(2010)は、2014 年に地球に接近するダストトレイルの中で 1819 年以前に放出されたものでは、1771 年放出のダストトレイルが 2014 年 12 月 1 日 22 時 59 分 UT に地球に接近すると予報していた。しかしながら、彼らは、このダストトレイルは非常に長く引き伸ばされているので、ZHR は非常に小さいであろうことを指摘していた。それに加えて、その放出速度が  $10.98 \text{ km s}^{-1}$  と大きいことから、このダストトレイルからの流星出現は暗い流星として観測されることが予想できる。3-2-2 で議論したように、観測からは、ほうおう座流星群の主たる活動は+4 等以上の明るい流星であったことを示している。それゆえに、1771 年のダストトレイルは今回観測された流星群の出現には寄与していないと考えられる。

今回の観測は、ビデオと写真によるものでその視野も観測極限等級もさまざまであった。それゆえに、この結果を直接的に 1 個人の眼視観測結果である 1956 年の観測と比較するこ



とは難しい。重複観測分を除いた観測機材トータルでの観測群流星数と散在流星の観測数を比較することにより (図 3-4)、ここではピーク時での眼視観測に相当する流星数を推定した。ほうおう座流星群の流星数と散在流星数との比は、01 時 00 分 UT から 02 時 00 分 UT と 02 時 00 分 UT から 03 時 00 分 UT で、それぞれ  $9/16=0.56$ 、 $11/20=0.55$  であった。01 時 00 分 UT から 03 時 00 分 UT での合計では、 $20/36=0.56$  であった。眼視観測から得られた 1 時間当たりの流星数(HR)は、日周変化と年周変化により変動する (Murakami, 1955, Mckinley, 1961, Jenniskens 1994)。ここで、地方時で 20 時 00 分から 22 時 00 分 (今回の観測地では 01 時 00 分 UT から 03 時 00 分 UT に相当する) までの間で観測される散在流星数の HR が 7 であるすると (Murakami 1955)、ほうおう座流星群のそれ以外の流星との流星数の比率は 0.56 であるので、ほうおう座流星群の HR は、3.9、ZHR は 6.6 (02 時 00 分 UT の輻射点高度で補正) となる。

1956 年の観測については Ridley(1962)がニュージーランド、オーストラリアと南アフリカで行われた眼視観測をまとめた結果について Rendtel(1996)が再解析している。彼は、14 時~18 時 UT の観測データがないことが原因で、活動の明確な極大は見いだせなかったと結論付けた。それに対して、Huruhata & Nakamura(1957)によれば、Nakamura が最初に流星群に気がついたのは 13 時 40 分であり、その後の観測でのおおよその HR は、100 (14 時 00 分 UT)、100 (15 時 00 分 UT)、200 (16 時 00 分 UT)、300 (16 時 30 分 UT)、100 (17 時 00 分 UT) であった。彼らは、極大は 16 時 30 分であったと報告している。この極大時刻は Watanabe et al.(2005)のダストトレイルによる計算結果の極大時刻と一致している。このことにより、Watanabe et al.(2005)は、この突発出現は、主として親天体の 1760 年から 1808 年の回帰のときに放出されたダストトレイルが引き起こしたと指摘した。極大時刻 (16 時 30 分 UT) の視輻射点の高度で補正した極大 ZHR は、約 360 になる。この視輻射点は、1808 年のダストトレイルのからの計算値である地心輻射点の赤経=3.50 度、赤緯=-41.79、地心速度=10.45 km s<sup>-1</sup> から計算した。

Sato & Watanabe(2010)は、2014 年の出現予報において 1956 年の出現に寄与したと考えられるダストトレイルの fM 値と 2014 年に接近するダストトレイルの fM 値を比較した。fM の値は、ダストトレイルの引き伸ばされ具合の目安で、接近するダストトレイルの部分について、実際に黄道面を通過する時間を  $\Delta t_0$ 、同部分が惑星による摂動が無いと仮定したときの 1 回帰後に黄道面を通過する時間を  $\Delta t$  としたときに、 $fM = \Delta t_0 / \Delta t$  で定義されている。それゆえに、fM 値は、ダストトレイル内のダストの密度を表している。Sato & Watanabe(2010)は、20 世紀初頭に彗星が 1819 年に出現したときと同じ程度に活動をしていたと仮定したうえで、fM 値を用いて極大時の ZHR の予想を行った。Watanabe et al. (2005)は、1956 年の突発出現に寄与したダストトレイルの fM を合計した値は 0.224 であったと示した。1909 年から 1930 年に親彗星から放出・形成され 2014 年に地球に 0.001AU 以内に接近する 5 本のダストトレイルの fM の合計値は、0.130 である (Sato & Watanabe, 2010)。もし 289P/Blanpain 彗星が、1956 年の突発出現を起こした流星体が 1750 年から

1808年に放出したのと同等の彗星活動を1909年から1930年にもしていたなら、接近する5本のダストトレイルのからの最大ZHRは、約200になる( $360 \times 0.130 / 0.224$ )。観測から得られた最大ZHRは、約7であった。この値によれば、2014年の群流星の活動は、彗星が20世紀初頭に19世紀初頭と同じ活動をしていたと仮定したときの10%以下である。

これらのことから、ほうおう座流星群の親天体である289P/Blanpain彗星は、19世紀以降活動を低下させながらも20世紀初頭には、活動度は10%以下に低下してはいたが、まだ彗星としての活動を継続して流星体を放出していたと結論づけられる。

Jenniskén & Lyytinen(2005)は、1956年のほうおう座流星群の突発出現をBlanpain彗星の1819年かそれ以前の回帰の際の分裂によるダストの放出が引き起こし、そして、2013 WY<sub>25</sub>は、Blanpain彗星の分裂の破片の残骸であると指摘している。しかしながら、Jewitt(2006)は、2013 WY<sub>25</sub>の彗星としての弱い活動を報告した。さらには、2013年7月には予想等級より明るい彗星としての明確な活動、アウトバーストが観測された。それゆえに、この小惑星は、まだなお彗星としての活動を幾分かは継続していることは明らかである。今回の観測結果からは、20世紀初頭のほうおう座流星群の親天体は、流星群を生み出す程度には彗星としての活動を行っていたと考えられる。

以上のほうおう座流星群の研究は、関連する流星群のダストトレイル理論によるモデルシミュレーションと流星群の観測とから親天体自体の観測がなかった時期の親天体の活動を推測するという手法を適用した初めてのケースである。この手法による研究は、流星群の力学的進化についての研究のみならず彗星の進化についての情報を提供するものでもあり、太陽系小天体の相互の関係を研究するうえで重要である。

### 3-5 結論

Sato & Watanabe (2010)の予報にもとづき我々は2014年12月1日にアメリカ合衆国ノースカロライナ州に遠征してほうおう座流星群の光学観測を実施した。薄明終了時より観測を開始し、天候が悪化した04時UTに観測を終了した。ほうおう座流星群は、約5時間の観測で29個捉えたが、散在流星の活動より低いレベルの活動であった。結果をまとめると以下のとおりである。

- (1)12月2日01時から02時(UT)台にかけて穏やかな高原上の極大があった。
- (2)1点観測から求めた輻射点位置は、予報とよく一致していた。
- (3)輻射点の広がり小さかった(2度以内)
- (4)明るい流星主体の活動であった

これらのことから、観測されたほうおう座流星群の流星は、20世紀初頭に親天体から放出された流星体によるものと考えられる。流星群の活動は、1956年の活動の1/10以下であり、このことから、親天体のBlanpain彗星は、20世紀初頭にも彗星としての活動は行っていたが、彗星としての活動は19世紀初頭の1/10以下であったと考えられる。

## 4 南極昭和基地で行った南天で活動する流星群のビデオ観測

流星群の活動を観測することは、これまでの章ですで見えてきたように、彗星や小惑星などの太陽系小天体の進化を知る上で重要な情報を提供する。また、新たに流星群の活動を見出すことは、その活動の源である地球に接近する未知の潜在的危険天体 *potentially hazardous objects* (PHO)としての親天体の情報を得ることができるという点からも重要である。南天で活動する流星群の観測と研究は、これまで北天に比べると手薄であった。この章では、第53次日本南極地域観測隊での公開利用研究として実施した南極昭和基地での南天流星群を対象とした観測について述べ、結果について考察した。

### 4-1 序論

流星群の観測は、眼視、写真、レーダー、ビデオの観測手法で行われてきた (McKinley 1961; Cepplecha 1998; Jenniskens 2006)。近年では、自動化されたビデオカメラによる定常的な観測が流星群の観測、特に新たな流星群の検出と確認に大きな成果を上げてきた (Molau & Rentel 2009; SonotaCo 2009; Andreić et al. 2014; Gural et al. 2014; Šegon et al. 2014; Rudawska et al. 2015; Jenniskens et al. 2016a, 2016b, 2016c)。これらのビデオ観測は、主として日本、ヨーロッパ、北アメリカ等北半球で活発に行われてきた。

これに対して南半球での流星群の観測は、相対的に低調である。眼視観測では、1927年から1934年に行われたニュージーランドでの眼視観測での結果が、McIntosh (1935)によりまとめられた。その後、1980年代にはある程度の組織的な観測が西オーストラリアで実施され、いくつかの流星群の活動について報告がなされた (Wood 1984, 1987; Jenniskens 1994; Jenniskens 2006)。

1953年ごろのからの初期のレーダーによる電波観測は、ニュージーランドのクライストチャーチ (Ellyett & Roth 1955) とオーストラリアのアデレード (Weis 1955; Nilsson 1964; Gartrell & Elford 1975) で実施された。1990年から2000年代にはクライストチャーチでの *Advanced Meteor Orbit Radar* (AMOR) が非常に多くの流星の軌道を決定したが (Galligan 2003; Galligan & Baggaley 2005)、アンテナの指向性のビーム幅が極めて狭い (約2度) レーダーを用いた観測方法自体は流星群を観測するには適していなかったため、流星群の観測では大きな成果はなかった (Jenniskens 2006)。最近の研究では、アデレードと南極デービス基地でのそれぞれ1点観測からの流星群観測が行われた (Younger et al. 2009)。より最近では、アルゼンチンの *Southern Argentina Agile Meteor Radar* (SAAMER) (Janches et al. 2013) で行われた組織的な流星群観測は、新たに南天での34個新しい流星群を見出した (Pokorný et al. 2017)。

ビデオ観測は、小規模な2点観測 (Jopek et al. 2010) と2カ所での1点での観測の結果が報告されている (Molau & Kerr 2014)。最近、ニュージーランドで、*Cameras for Allsky Meteor Surveillance project* (CAMS) (Jenniskens et al. 2011) の技術を用いた計画的なビデオカメラによる流星群の2点観測が開始されたが、まだ2015年の大みそかのとびうお座流

星群の突発的な出現の結果が報告されたのみで (Jenniskens et al. 2016d) 詳細な全般的なサーベイ結果は報告されていない。

北半球からの観測が困難な南天で活動する流星群の本格的な光学観測 (ビデオ観測) によるサーベイはまだ最近に始まったところであり、これまでの北半球での観測と比べると観測データは極めて少ない。そこで、2012 年に第 53 次南極地域観測隊の公開利用研究として、南天での流星群活動を調べることを目的に南極昭和基地でビデオ観測を実施した。極域の高緯度地域では、冬季には光学観測できる時間が増加することにより、中緯度地域では光学観測できない時間帯に出現する流星を観測することができる。また、レーダーとビデオの観測では、検出できる流星体の速度や質量が異なるので (Jenniskens et al. 2016a)、流星群の検出をビデオ観測から行うことは重要である。この章では、2012 年 2 月から 10 月まで小型高感度ビデオカメラとパソコンを組み合わせた自動流星検出・記録システムを南極昭和基地に設置して実施した流星のビデオ観測から得られた流星群の活動について報告する。南極域で、流星を対象とした定常的な光学観測は過去に例がなく、世界で初めての取り組みである。

## 4-2 観測機材と観測

### 4-2-1 観測機材

観測は第 53 次南極地域観測隊における公開利用研究として第 53 次隊が南極昭和基地 (図 4-1) に越冬中の 2012 年の 2 月から 10 月に実施した。機材はすべて日本国内から昭和基地に運び、観測終了後に国内に持ち帰った。ビデオカメラには、ワテック社の高感度 1/2 インチサイズ CCD カメラ (WAT-902H2U) を使用し、CBC 社の焦点距離 6mm F0.8 の CS マウントレンズを装着して、昭和基地の情報処理棟 (南緯 69 度 00 分、東経 39 度 35 分) の屋上に設置されているドームに設置した (図 4-2)。各ビデオカメラの観測視野は 56 度×43 度で、2 台のビデオカメラは、北向きカメラ (以下、カメラ A) は方位角 0.5 度 (北から東回り、以下同じ) 仰角 61.1 度で南向きカメラ (以下、カメラ B) は方位角 175.1 度、仰角 65.0 度で、天頂を挟んで視野がほぼ南北対称になるように向けられた (図 4-3)。画像は、NTSC 規格 (1 秒あたり 30 フレーム、2 フィールドで 1 フレームを構成) で撮影した。このシステムで撮影できた恒星の最微光星は約 4 等星であった。ビデオ信号は、ビデオケーブルを経て情報処理棟内に設置された観測専用パソコンに入力して記録した。

### 4-2-2 観測

観測は太陽高度が -12 度以下になった 2012 年 2 月 25 日より開始した。9 月 25 日までは、天候にかかわらず、毎夜、15 時 00 分 UT から 4 時 30 分 UT (現地時刻 18 時から翌日 7 時 30 分) に観測を行った。9 月 26 日から 10 月 31 日までは朝夕の薄明時間の開始・終了時間に合わせて観測時間を段階的に短くしていった。観測は、あらかじめ観測スケジュールを観測ソフト内で設定しておくことにより自動運用で行った。ビデオカメラ電源の定

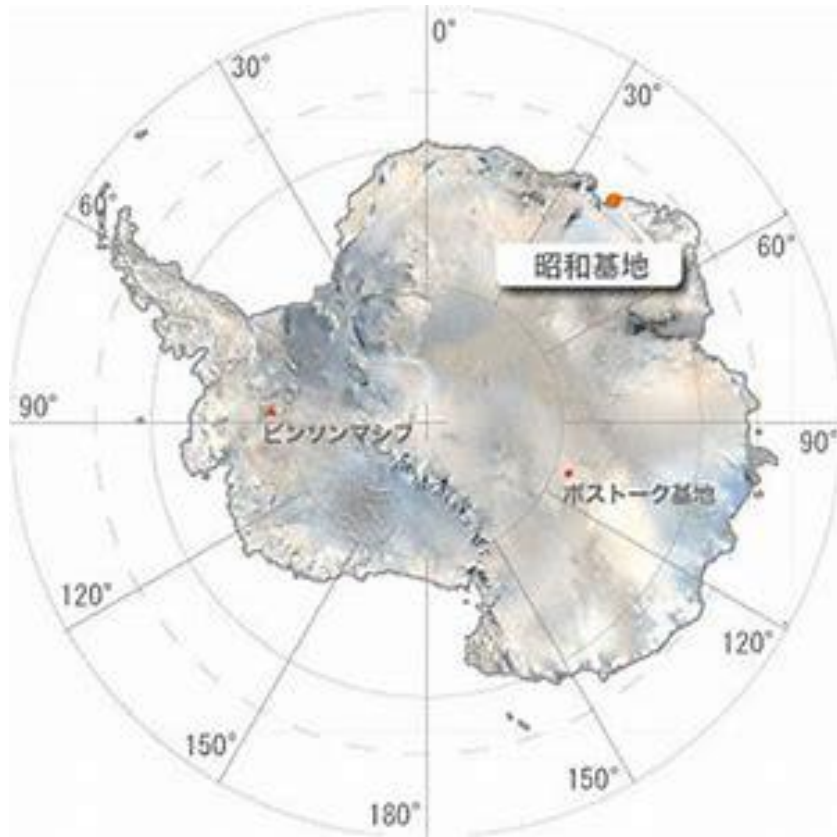


図 4-1 南極大陸と昭和基地の位置 緯度を表す円は 10 度単位で、一番外側の円が南緯 60 度を示している。60 度の内側の波線は、南緯 66 度 33 分を示している。

地図の出典:国立極地研究所 <http://polaris.nipr.ac.jp/~academy/science/kansoku>)

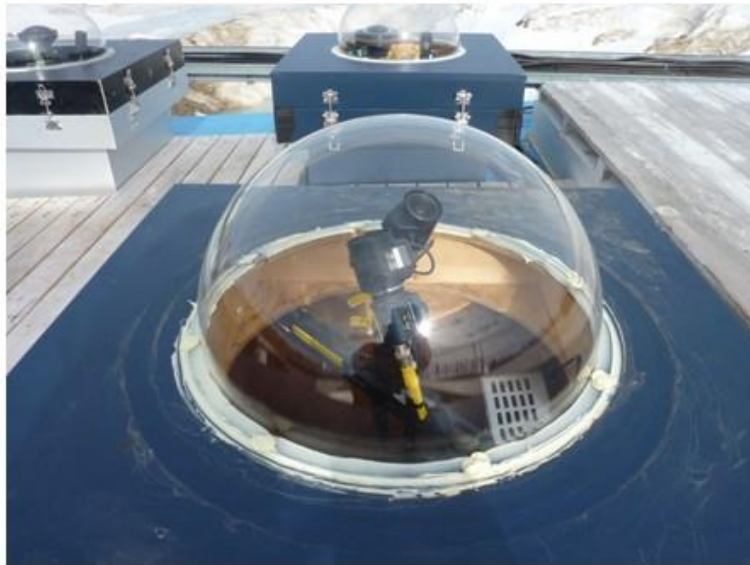
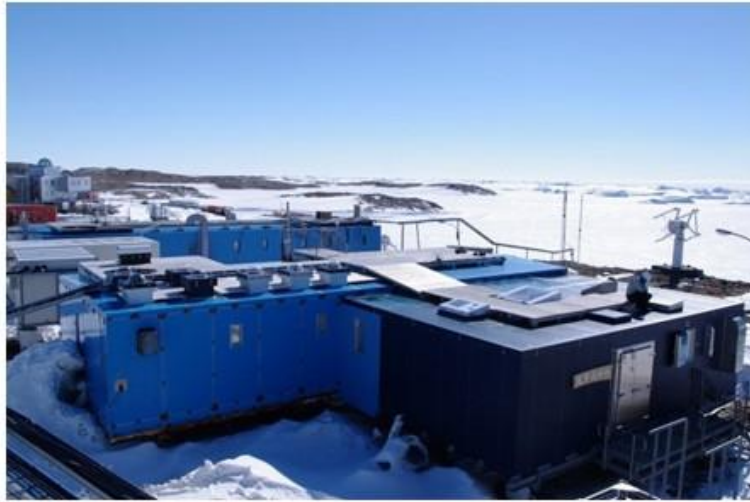


図4-2 観測場所と観測カメラの設置状況 ビデオカメラは昭和基地の情報処理棟(上の写真)の屋上に設置されたドーム(下の写真)に設置された

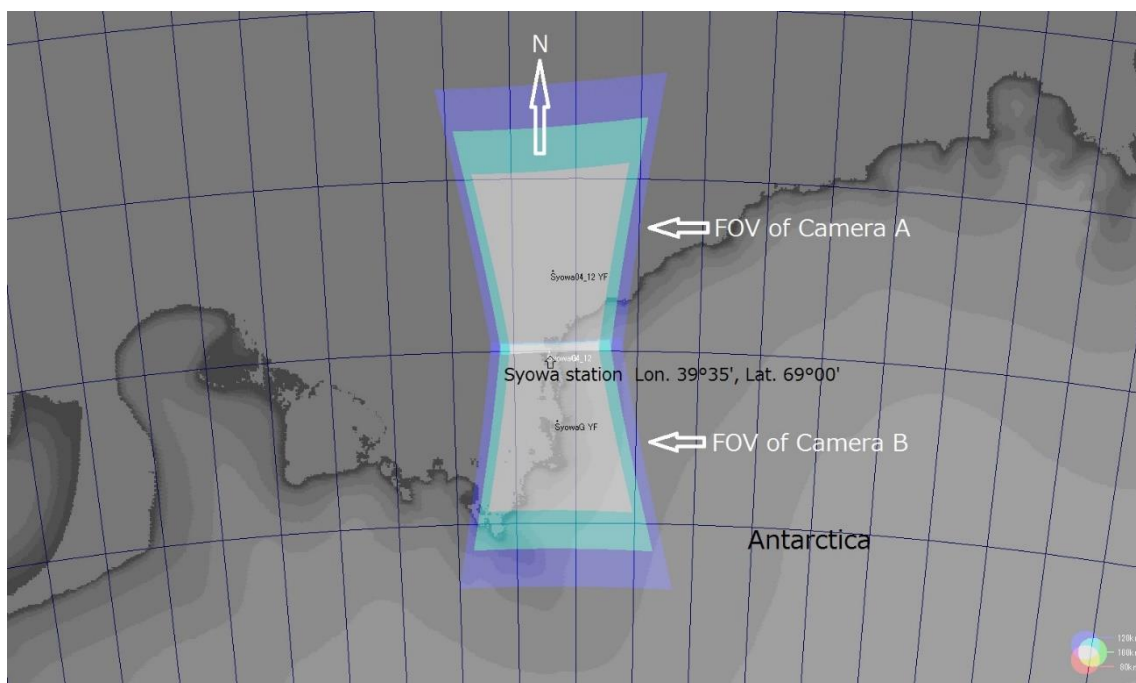


図 4-3 観測視野 灰色の部分には地上高 80km での観測視野を示している。水色と青色はそれぞれ地上からの高度を 100km と 120km にしたときに増加する部分を示している。

期的な ON/OFF コントロールには、インターネットを介して制御可能なタイマーを用いた。ビデオカメラからの動画は、ビデオキャプチャーボードによりパソコンに取り込み、観測用ソフト UFOCaptureV2 (UC2) (SonotaCo 2009)を用いてリアルタイムで処理した (3-3-3 参照)。観測データは、適時、パソコン内蔵ハードディスクより外付けのハードディスクに転送・保存された。観測装置の動作のモニター、データの点検と不要画像データ (流星以外のデータ) の削除は日本からネットワークを経由してパソコンを遠隔操作して実施した。観測は 2012 年 10 月 31 日で終了した。最後に観測された流星は、2012 年 10 月 24 日 20 時 33 分 33 秒 UT に記録された。このときの太陽高度は  $-8.8$  度であった。

月別の観測夜数と観測流星数のサマリーを表 4-1 に示す。自動観測は、天候にかかわらず毎夜実施したが、6 月と 7 月にブリザードを流星と誤検出した結果、ハードディスクの容量がオーバーしたことによる観測中断期間が出た。2 月 25 日から 10 月 31 日までの観測期間中に流星が検出できた夜は 114 夜で、観測機材が稼働していた 234 夜の 49% であった。観測流星数は、カメラ A で 636 個、カメラ B で 459 個であった。両方で重複して観測された流星 40 個を除くと 1055 個の流星が観測された。7 月から B カメラでの検出数が A カメラに比べて明らかに減っているのは、7 月以降に B カメラの感度が低下したことによる。原因は不明ながら恒星での撮影限界等級が約 1 等級低下した。観測された流星の光度分布を図 4-4 に示す。我々のシステムでは、主として 1 等級より明るい流星が観測された。

#### 4-2-3 データ解析

流星画像の位置や光度測定は、UC2 と連携した解析ソフトウェア UFOAnalyzerV2(UA2) (SonotaCo 2009, 2016) を用いた (3-2-4 参照)。UA2 では、UC2 で記録された動画と静止画を用いて個々の流星の位置と光度を動画のフィールド単位で測定することができる。恒星の位置測定誤差は  $0.02$  度で光度の測定誤差は  $0.2$  等であった。測定結果は CSV ファイルで出力されるとともに流星の位置は中心投影法で描かれた星図に経路を出力することができる。すべての流星画像の測定は、第 53 次南極地域観測隊による機材撤収後に日本国内で実施した。

#### 4-2-4 流星輻射点の検出法

今回の 1 観測点での観測では、流星経路の逆延長が 1 点に収束する位置を求めることにより輻射点を検出した。具体的な検出手法決定のため、過去の事例を参照しながら、以下のような検討を行った。Olivier (1925)によるこの方法での輻射点検出の基準は、次のとおりである。(a)一人の観測者が一晩の 4 時間以内に観測した 4 個以上の流星の経路の逆延長が直径 2 度以内の円内で交差した場合。(b)一晩における 3 個の流星と翌晩のほぼ同じ時間帯に観測された最低 2 個の流星により、これら 5 つが(a)と同じように交差すること。

American Meteor Society (AMS)は、眼視観測から流星経路を星図に記入する手法により輻射点を決定する基準として Olivier の方法を用いている。小楨・藪(1971)は、眼視観測での



表 4-1 月ごとの観測夜数と観測流星数

	観測夜数	観測時間 (分)	カメラ A(北向き)		カメラ B(南向き)		カメラ A+B (total)		同一流星の数 (Y)	流星数 (X-Y)
			流星が記録された夜数	流星数	流星が記録された夜数	流星数	流星が記録された夜数	流星数 (X)		
2月	5	4,050	1	4	1	1	1	5	0	5
3月	31	25,110	10	37	6	37	10	74	3	71
4月	30	24,300	15	119	15	106	18	225	10	215
5月	31	25,110	11	83	13	116	13	199	4	195
6月	17	5,670	6	29	6	36	6	65	2	63
7月	28	23,490	19	145	15	78	20	223	8	215
8月	31	25,110	14	79	9	44	15	123	7	116
9月	30	23,250	19	99	14	29	19	128	3	125
10月	31	14,640	11	41	7	12	12	53	3	50
合計	234	170,730	106	636	86	459	114	1,095	40	1,055

Y：カメラ A と B で同時に撮影された同一流星の数

流星経路の観測精度を考慮して輻射点の広がりを直径 5 度以内とされていた。輻射点の検出に当たっては、これらの基準をもとに、我々のビデオ観測用に修正を検討した。熟練した眼視観測者の流星の位置決定誤差は約 3 度であり (McKinley 1961)、我々のビデオ観測から得られた流星の経路の精度は眼視観測のそれよりもはるかに良い。しかしながら我々の今回の観測期間中に 1 夜で 10 個以上の流星が検出されたのは 44 夜しかなかった。そこで輻射点を検出するにあたっては、眼視観測の基準では 2 日間としている観測期間を 3 日間とすることで観測対象期間を拡大した。すなわち連続した 3 夜でその間の流星数が合計で 10 個以上観測されている期間を 1 セットとしてその期間内で輻射点の検出を行った。この基準により今回の観測からは 60 セットの対象期間が得られた。輻射点の検出条件としては、5 個以上の流星の経路の逆延長が直径 5 度以内に交差していることとした。5 度の範囲としたのは、天頂引力による影響 (3-2-5 参照) と 3 日間の観測期間での輻射点移動を考慮に入れたことによる。

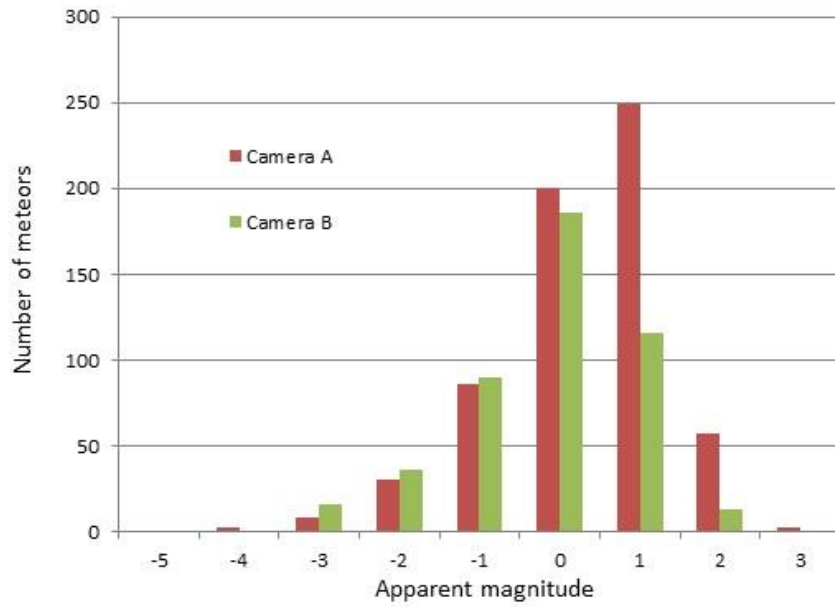


図4-4 観測された流星の光度分布 カメラAは北向き仰角61度、カメラBは南向き仰角65度にセットされた。

## 4-3 観測結果

### 4-3-1 検出された輻射点

各観測期間に観測された流星については、UA2により中心投影法で作図した星図に経路を記入した。5月2/3日から4/5日に作図例を図4-5に示す。それぞれの星図において目視で4-2-4で述べた基準に基づき輻射点を探し、検出した輻射点のおおよその赤経、赤緯を星図から読み取った。さらにUA2により決定した個々の流星の測定位置から長沢(1978)の方法で輻射点位置とその広がりを正確に求めた。60のデータセットからは32個の輻射点検出された。なお、1セットの観測期間を3日間取ったことにより、前後の観測セット間で重なる2日間に観測された同じ流星から検出された輻射点もあったが、そのような重複を除いた結果が32個である。これらの輻射点の出現時の太陽黄経と位置とをIAU MDCの流星群リストと比較することにより既知の流星群との同定を行った。同定に際しては、活動期間と輻射点の位置の両面から検討した。活動期間については、IAU MDCの流星群リストでは極大の太陽黄経しか掲載されていないので、リストの元になった論文に報告されている活動期間を調べて、我々の検出した輻射点の観測期間と重なるものを抽出した。そのうえで検出した輻射点と既知群の輻射点位置とを比較して、基本的に両者の位置の角距離が5度以内のものを同一の流星群と判定した。

表4-2に検出された輻射点の諸要素を一覧表にして示す。2重日付、例えば13/14日はUTで13日夕方から14日翌朝までの観測(14日00時UTを含む)を意味している。太陽黄経(J2000.0)は、観測期間の中心日の00時UTの値で示している。結果として確定群が4群、未確定群が3群が同定され、残り9群は未確定の流星群に対応すると考えられる。全32個の輻射点の分布を太陽を原点とした黄経と黄緯による図4-6に示す。図4-6では、太陽は年間を通して太陽中心黄経0度のところに位置している。この太陽中心黄経では、地球の公転方向(apex)は270度の方向である。図には、IAU MDCの確定群とワーキングリストに掲載されている未確定群は流星群コードで示している。今回新たに検出した輻射点は9つで、図中には①から⑨の番号で示した。

### 4-3-2 確定群

検出した確定群は、表4-2において流星群名の略称で示した。検出した確定群で最大の活動であったのは、みずがめ座 $\delta$ 南流星群(Southern delta Aquariids 略称: SDA、IAU MDC #0005)であった。SDAは南天での最も活発な活動を行う流星群である(Molau & Kerr 2014; Pokorný et al. 2017)。本研究での輻射点検出基準では、7月22日(UT)から8月9日(UT)までの間の7データセットで検出され、全流星観測数は48個であった(表4-3)。

次に活発な活動を示したのは、みずがめ座 $\eta$ 流星群(eta Aquariids 略称: ETA IAU MDC#0031)であった。4月28日(UT)から5月9日(UT)までの7データセットで検出され、全流星観測数は24個であった(表4-4)。

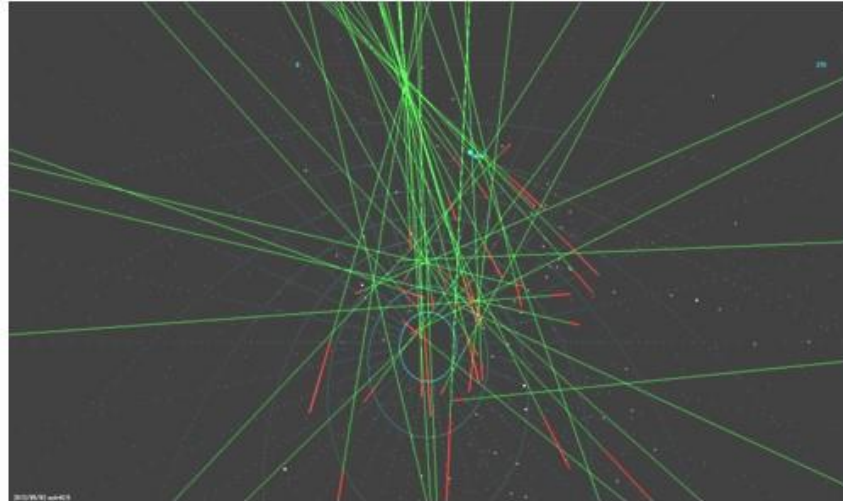


図4-5 2012年5月2/3日から4/5日の3夜に観測された流星経路とその逆延長線 赤い部分が流星の経路で、緑色の線は流星の経路を逆に(流星の消滅点から出現点方向に)延長した線である。流星の輻射点は、この緑色の経路の逆延長線上に存在する。図の中央上の部分で緑色の逆延長線が狭い範囲で交差している。この交差点がこの観測から得られた輻射点である。

表 4-2 観測から検出された輻射点

No.	D.No.	観測期間	夜数	太陽黄経	流星数	赤経	赤緯	d	確定群	未確定群	新 RP
1	4	3月13/14~15/16日	3	353.5	5	258.1	-48.1	1.4		GNO	
2	14	4月26/27~28/29日	3	38.9	5	333.1	-4.7	0.5	ETA 1		
3	14	4月26/27~28/29日	3	37.9	6	346.9	-55.8	0.4			1
4	14	4月26/27~28/29日	3	38.9	5	300.8	-51.3	0.3			2
5	16	4月28/29~30/5月1日	3	39.9	9	333.1	-5.2	0.6	ETA 2		
6	17	4月29/30~5月1/2日	3	40.9	10	334.2	-4.7	0.8	ETA 3		
7	17	4月29/30~5月1/2日	3	40.9	5	294.2	-68.9	1.0			3
8	18	4月30/5月1日~2/3日	3	41.8	28	335.4	-3.8	1.0	ETA 4		
9	18	4月30/5月1日~2/3日	3	41.8	8	274.3	-65.0	0.9			4
10	18	4月30/5月1日~2/3日	3	41.8	5	293.9	-29.3	0.5			5
11	19	5月1/2~3/4日	3	42.8	24	335.6	-3.7	0.9	ETA 5		
12	19	5月1/2~3/4日	3	42.8	10	274.3	-64.6	0.9			4
13	20	5月2/3~4/5日	3	42.8	18	336.0	-3.3	0.8	ETA 6		
14	21	5月8/9~9/10日	2	48.6	6	339.9	-1.0	0.3	ETA 7		
15	23	5月11/12~12/13日	2	51.5	5	288.8	-36.4	0.3		CAU	
16	26	6月1/2日~3/4日	3	72.7	5	269.0	-48.3	0.7			6
17	26	6月1/2日~3/4日	3	72.7	6	328.0	-70.3	0.6			7
18	27	6月2/3日~4/5日	3	73.6	5	269.5	-48.1	0.5			6
19	29	7月5/6~7/8日	3	104.2	7	10.1	-55.8	1.1		ZPH	
20	37	7月22/23~24/25日	3	121.3	10	333.2	-19.3	1.1	SDA 1		
21	38	7月23/24~25/26日	3	122.3	16	337.0	-19.0	1.6	SDA 2		
22	39	7月24/25~26/27日	3	123.2	21	337.3	-18.7	1.5	SDA 3		
23	39	7月24/25~26/27日	3	123.2	5	304.4	-12.7	1.9	CAP		
24	40	7月25/26~27/28日	3	124.2	21	337.4	-18.5	1.4	SDA 4		
25	41	7月31/8月1~1/2日	2	129	6	341.2	-17.4	0.7	SDA 5		
26	42	8月6/7~8/9日	3	135.7	9	347.2	-16.0	0.9	SDA 6		
27	42	8月6/7~8/9日	3	135.7	10	42.6	-13.7	1.5	ERI 1		
28	43	8月7/8~9/10日	3	136.6	9	43.0	-13.5	1.2	ERI 2		
29	43	8月7/8~9/10日	3	136.6	7	347.4	-15.4	0.8	SDA 7		
30	44	8月19/20~21/22日	3	150.1	5	58.5	-21.4	1.6			8
31	45	8月21/20~23/24日	3	151.1	5	58.6	-19.9	1.2			8
32	55	9月11/12~13/14日	3	170.4	5	40.9	-59.9	1.2			9

D.no.: データセット(1-60)上の番号, 太陽黄経: 観測期間の中央値 (J2000.0, 赤経、赤緯: J2000.0, 分点での輻射点の位置 (°), d: 輻射点の広がり(°), 新 RP: 新たに検出した輻射点 (No.)

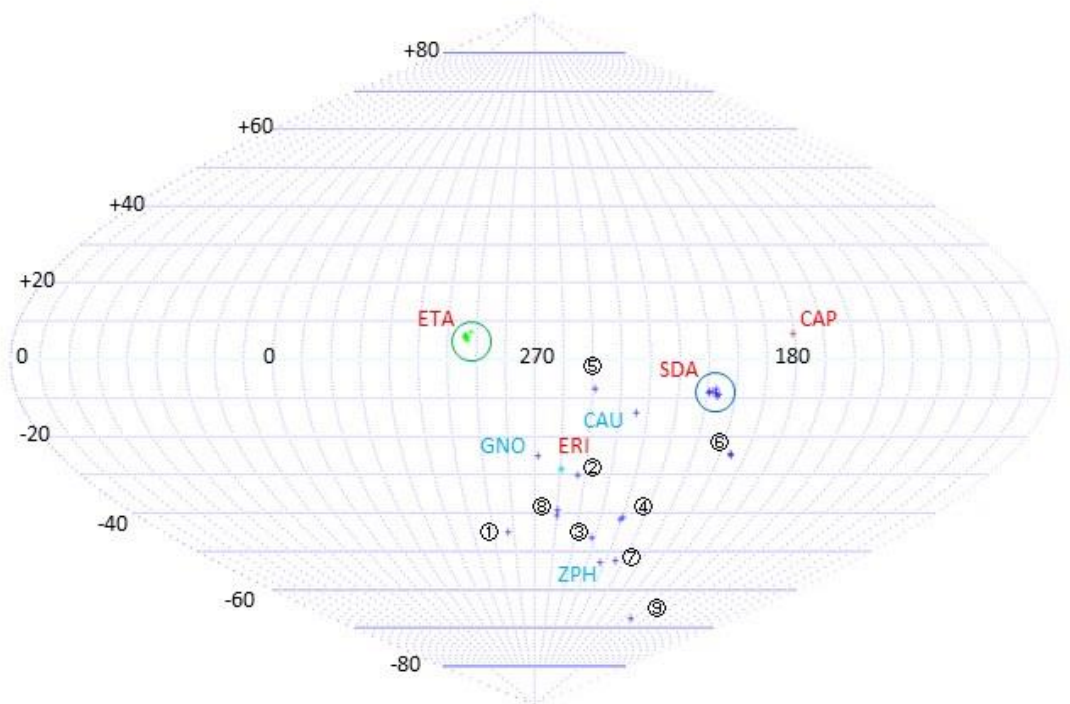


図4-6 32個の輻射点の分布 太陽を中心とした黄経と黄緯による図に輻射点はプロットされている。確定群はIAUの流星群コード(赤色)、未確定群はIAUの流星コード(青色)で示している。新たに検出した輻射点には①から⑨までの番号が付されている。

エリダヌス座 $\eta$ 流星群(eta Eridanids 略称: ERI IAU MDC#0191)は、北半球での光学観測で検出された流星群であり (Ohtsuka et al. 2002, SonotaCo 2009, Jenniskens et al. 2016) 太陽黄経 137 度付近に活動の極大がある。南天でのビデオ観測 (Molau & Kerr 2014) では、8 月 9 日 (太陽黄経 136 度) に活動の極大を認めている。今回の観測では、8 月 6 日(UT) から 8 月 10 日(UT)までの 2 データセットで検出され、全観測流星数は 13 個であり (表 4-5)、活動時期や輻射点位置は、従来の結果とよく一致している。

やぎ座 $\alpha$ 流星群(alpha Capricornids 略称: CAP IAU MDC#0001)はよく知られた確定流星群であるが、活動期間は長いものの、極大時での眼視観測での最大 ZHR は 3 以下と活動度が低い (Jenniskens 2006)ので、我々の輻射点検出基準では、7 月 25・26 日の 1 データセットで 5 個の流星による活動しか検出できなかった (表 4-6)。

#### 4-3-3 未確定群

検出した未確定群は、表 4-2 に流星群の略称で示した。じょうぎ座 $\gamma$ 流星群(gamma Normids 略称: GNO IAU MDC#0118)は、南半球でのレーダー観測 (Gartrell & Elford 1975) と眼視観測 (Jenniskens 1994) による報告がある。表 4-7 に示す今回の結果は、1980 年代のオーストラリアでの眼視観測によるものと活動期間(3 月 13 日から 14 日) が一致している (Wood 1987)。南のかんむり座 $\beta$ 流星群 (beta Coronae Australids) は、IAU MDC にナンバー 0146 CAU としてリストアップされている。しかしながら、その出典は Rendtel et al.(1995)の International Meteor Organization(IMO)の Meteor Shower Calendar の 1995 年版の流星群リストであるとされている。この IMO のリストには単に活動時期と輻射点の情報のみ掲載され、その他の詳細は不明である。今回検出した輻射点は、この流星群の時期と位置にほぼ一致している (表 4-8)。オーストラリアでの眼視観測の結果では、今回の結果より幾分活動時期は遅れるが (太陽黄経 52~59 度) 極大時期は明確ではないようである (Jenniskens 1994)。ほうおう座 $\zeta$ 流星群(zeta Phoenicids 略称: ZPH IAU MDC#0768)は、最近の電波観測により新たに見つかった流星群である (Pokorný et al. 2017)。表 4-9 に示す今回の検出した輻射点は、この流星群の活動時期と輻射点位置にほぼ一致している。

#### 4-3-4 新たに検出した輻射点

新たに検出した 9 個の輻射点は、表 4-2 において新 RP の列で 1 から 9 までの番号を付して示した。No.4, 6, 8 は、2 つのデータセットで検出された。No.4 を除いて流星数は 5 から 6 個と多くはない。このことは流星経路の延長が偶然に集中したことの可能性を排除できない。しかしながら、これらの輻射点の広がり最大で No.8 の 1.6 度であり平均では 0.8 度となっている。従って、得られた結果が輻射点である可能性が高いと考える。新たに検出した 9 個の輻射点のうち No.1, 3, 4, 7 の 4 個は南トロイダルソース (Jenniskens 2006) の領域に位置していた。

## 4-4 議論

### 4-4-1 確定群

みずがめ座  $\eta$  流星群(ETA)とみずがめ座  $\delta$  南流星群(SDA)は南天で活発な活動を示す流星群である。今回の流星群の検出基準では、ETA で 11 日間、SDA で 18 日間にわたり検出された。ETA は他の観測 (Jenniskens 2016; Molau and Rendtel 2009; Pokorny et al. 2017) から求められている極大周辺は天候不良で観測できなかつたので、観測から決定した輻射点の日々移動を用いて極大時(太陽黄経 46 度)の輻射点位置を求めた(表 4-4 の ETA-2)。ETA と SDA の輻射点の位置とその移動については、他の観測結果と一致している(表 4-3, 表 4-4)。このことは、今回用いた流星群検出基準は、定常的に活動する流星群の極大期のみならず、初期あるいは末期のレベルでの群流星活動をも捉えており、流星群輻射点の検出に対して有効であることを示している。

やぎ座  $\alpha$  流星群(CAP)は、長期間にわたって観測されているが(Jenniskens 2006)、日々の活動度が高くはないので本研究での検出基準では 1 データセットでしか検出できなかった。

エリダヌス座  $\eta$  流星群(ERI)は、IAU MDC で定常群としてリストアップされている活発な流星群である。本研究では 2 データセットで 4 日間にわたり活発な活動が観測された(表 4-5)。観測できた 4 夜の前後数日は天気が悪くて観測データは得られなかった。ERI は、確定群としてビデオ観測からは明確な活動がとらえられているが(SonotaCo 2008, Jenniskens 2016a; Molau and Rendtel 2009)、SAAMER の観測からはとらえられていない(Janches et al. 2013; Pokorný et al. 2017)。さらに SAAMER とよく似た観測システムの CMOR の観測からも検出されていない(Brown et al. 2008, Brown et al. 2010)。これは、ERI の速度が 64km/s と速いためレーダーによるこの群が困難となっているものと思われる(Jeniens 2016a)。

Jenniskens(2016a)は、8月のERIの活動から10月のオリオン群の活動に連なっていく輻射点の構造をオリオン群テイルと名付けている。今回の観測では、このテイルに属しているエリダヌス座  $\nu$  流星群(nu Eridanids 略称: NUE IAU MDC#0337)の輻射点を通る流星を何個か検出したが、今回の検出基準を満たす輻射点としては検出できなかった。

### 4-4-2 未確定群

Kronk (2014) は、McIntosh (1935)の南天の流星群輻射点リストに Scorpiids として  $\alpha = 241$  度、 $\delta = -53^\circ$  活動期間 3 月 6-11 日とリストアップされている群が GNO の最初に指摘されたものだと指摘している。1969 年に Adelaide で行われたレーダー観測では、輻射点の幾分離れた二つの Associations としてリストアップされている(Gartell & Elford 1975)。Molau & Kerr(2014)は、輻射点位置の近い流星群活動をとらえているが、極大の太陽黄経で 9 度離れたところにあり、そのピークも明瞭ではなく同一群かどうかは明確ではない。今回の観測結果は、出現期間はオーストラリアでの眼視観測と一致しているが輻射点の位置は



少し異なる(Wood 1987)。これまでの観測結果からは、出現期間と輻射点位置についてのばらつきが大きい。確定群と認められるには、さらなる観測データ、特に軌道データが必要である。

SAAMER で新たに発見された流星群 (34 個) の大多数は南トロイダルソースの領域に輻射点がある (Pokorný et al. 2017)。今回の観測からは、このうちの 1 個 ZPH を検出しただけである。SAAMER でこの領域で検出された流星群は、長年のポインティングローバトソン効果により軌道半長径  $a$  と離心率  $e$  が小さくなった古い流星群であると考えられており (Pokorný et al. 2017)、レーダーで観測可能な質量の小さい流星体が主体であることがこの原因と考えられる。これまでの研究では、この領域の光学観測からの流星群活動の検討はほとんど行われていない。これらの群の活動を確認するには、より高感度のビデオカメラ (ICCD やソニーのデジタルカメラ  $\alpha 7s$  等) での観測が必要である。高感度カメラでの狭視野とより暗い群流星を散在流星から分離して検出するには、できれば距離が 30 km 以上離れた多点同時観測が望ましい。

#### 4-4-3 新たに検出した輻射点

表 4-10 に新たに検出した輻射点を示す。4-2-5 で示したように新たに検出した 9 個の輻射点のうち No.1, 3, 4, 7 の 4 個は南トロイダルソースの領域に位置している。この 4 個の輻射点が南トロイダルソース中の長年のポインティングローバトソン効果により軌道半長径  $a$  と離心率  $e$  が小さくなった古い流星群なのかどうかは今後の観測による軌道要素の確認が必要である。図 4-7 で示した No.4 は観測流星数が 10 個あり、流星群の可能性が高いと考えられる。

No.8 は、極大時の太陽黄経が IAU MDC のリストとは 19 度異なるが、IAU MDC のリストのナンバー 0209 のエリダヌス座  $\epsilon$  流星群 (epsilon Eridanids 略称: EER) の輻射点位置に近い (表 4-11)。エリダヌス座  $\epsilon$  流星群は、IAU MDC では太陽黄経 170 度で極大を迎える流星群として Rendtel et al(1995)を出典としてリストアップされている。しかしながら、この出典の流星群リストでは、エリダヌス座  $\epsilon$  流星群は見当たらず、太陽黄経 155.7° にエリダヌス座  $\pi$  流星群がリストアップされている。エリダヌス座  $\pi$  流星群の輻射点は、赤経 = 52°、赤緯 = -15° で、オーストラリアでの眼視観測 (Jenniskens 1994) から得られたエリダヌス座  $\epsilon$  流星群の輻射点位置と一致していた。エリダヌス座  $\pi$  群とエリダヌス座  $\epsilon$  群は同一流星群の名称として混同して使われていると考えられ、これらを引用する際には注意が必要である (Jenniskens 1994, 2006)。オーストラリアでの眼視観測は個々の観測者による誤差が大きくて明確ではないが、Jenniskens (1994) のこの群の活動曲線 (Fig. 11) からは、極大が太陽黄経 152 度付近にあるようである。今回の検出した輻射点の時期および位置はこの流星群の値に近く、この流星群の活動をとらえた可能性がある。Drummond (1981)は、C/1854 L1 Klinkerfues 彗星からの流星群の輻射点を太陽黄経 169 度で赤経=53°、赤緯=-15° と予報している。Jenniskens(2006)は、1981 年にオーストラ

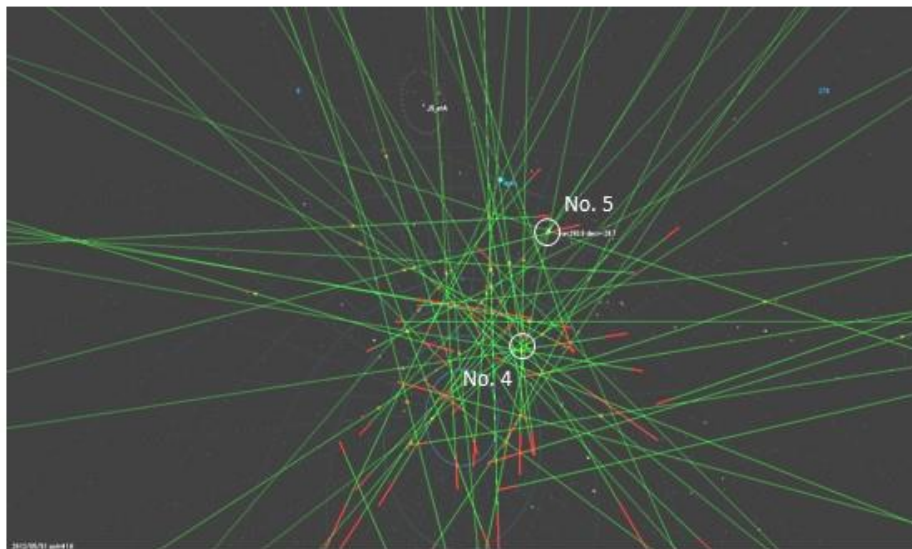


図4-7 新たに検出した輻射点No.4とNo.5 2012年5月1/2日から3/4日 みずがめ座 $\eta$ 流星群の流星(24流星)の経路は図から除いている。

リアで一人の観測者により 9 月 10 日 16h(UT)に突発的な EER の活動(ZHR 約 100) が観測されたが、C/1854 L1 Klinkerfues 彗星と中国の古記録から見出された C/962B1 彗星とが同一彗星であるなら周期を 127 年と仮定することによりこの彗星からの突発的な流星群の出現の可能性を指摘している。彗星軌道が長周期  $P=10400$  という研究 (Branham Jr. 2013) とは大きく異なることもあり、この彗星起源の流星群なのかは明確ではない。いずれにしても、この太陽黄経 152 度と 167 度付近に活動があるとされる「二つ」の EER の活動について明らかにするには、今後さらなる観測が必要である。

#### 4-5 まとめと将来プラン

本研究では、2012 年の 2 月から 10 月末まで南極昭和基地で南天での流星群の活動をとらえるために流星のビデオ観測を実施した。これは南極域で実施された世界で初めての流星の定常的な光学観測である。1 シーズンで 114 夜、1055 個の流星を観測した。観測した流星から流星輻射点を検出するために考案した基準を用いて 32 個の輻射点を検出した。この中から 4 個の確定流星群と 3 個の未確定流星群を同定した。確定流星群の観測結果からは、今回の研究で用いた輻射点検出の方法が有効であることが確認できた。未確定群については、過去の観測がかならずしも明確な結果ではないこともあり、今回の観測から検出したじょうぎ座  $\gamma$  群と南のかんむり群についてはさらなる確認観測が必要である。ほうおう座と流星群は、トロイダルソース中に位置する。トロイダルソースの領域でレーダー観測から新たに検出された流星群を光学的に同定するための観測には、さらに高感度の撮像機材による定常観測が必要であろう。また、今回 IAU MDC には掲載されていない輻射点を 9 個検出した。その内で 4 個は南トロイダルソースに位置していた。また、別の 1 流星群については IAU MDC の未確定群との関連について議論をおこなった。新たに検出した 9 個の輻射点については、それが定常的に流星群として活動しているかは今後の大きな観測課題である。

昭和基地に設置され運用されているオーロラや夜光を観測対象としたデジタルカメラやビデオカメラ等の長年にわたる画像データが極地研にデータベースとして蓄積されている。昭和基地でこれらの装置により撮像された流星を用いた研究もある (Suzuki et al. 2013)。これらのデータを用いて今回の研究と同様な手法で過去の流星群活動の調査をおこなうことは可能である。これらのデータの解析結果は南天で活動する流星群の新たな知見を得る可能性をもっている。

また、昭和基地で運用されている PANSY レーダーは、MU レーダーで行われた (Kero 2012b) のと同様な流星のヘッドエコー観測を行う能力がある。ダストトレイル理論を用いた予報により南天の高緯度でアウトバーストが期待できる流星群については PANSY レーダーのヘッドエコー観測での成果が期待できる。

表 4-3 みずがめ座  $\delta$  南群 (SDA)

	開始	終了	極大	赤経(°)	Ra dr	赤緯(°)	Dec dr
SDA	121.3	136.6	124.2	337.4	0.84	-18.5	0.24
Pokorný et al. 2017	111	161	125	339.2	0.79	-16.8	0.29
Jenniskens et al. 2016	117	146	128	341.3	0.95	-15.7	0.38
Molau & Kerr 2014	120	140	127	340.6	0.84	-16.0	0.16

開始・極大・終了：流星群の活動の始まり、極大、終わりを太陽黄経 (J2000.0) で示す。  
赤経・赤緯は極大時の輻射点の位置を示している (J2000.0)

Ra dr と Dec dr は、それぞれ赤経と赤緯の日あたりの輻射点移動値を度単位で示している。

SDA：今回の観測結果

表 4-4 みずがめ座  $\eta$  流星群 (ETA)

	開始	終了	極大	赤経(°)	Ra dr	赤緯(°)	Dec dr
ETA	38.9	48.6	41.8	335.4	0.73	-3.8	0.43
ETA-2			46	338.0		-2.1	
Pokorný et al. 2017	33	60	46	338.5	0.70	-1.2	0.34
Jenniskens et al. 2016	27	64	46	338.1	0.92	-0.8	0.37
Molau & Kerr 2014	34	57	47	338.9	0.62	-0.6	0.31

開始・極大・終了、赤経・赤緯、Ra dr と Dec dr の表現は、表 4-3 と同様

ETA：今回の観測結果 ETA-2：今回の観測から得られた輻射点移動値を用いて算出した太陽黄経 46 度の時点での輻射点位置を示している。

表 4-5 エリダヌス座  $\eta$  流星群 (ERI)

	開始	終了	極大	赤経(°)	Ra dr	赤緯(°)	Dec dr
ERI			136	42.8		-13.6	
Jenniskens et al. 2016	118	174	137	43.7	0.86	-11.9	0.29
Molau & Kerr 2014	128	146	136	42.6	0.84	-12.3	0.17
Ohtsuka et al. 2002			137.5	45		-12.9	

開始・極大・終了、赤経・赤緯、Ra dr と Dec dr の表現は、表 4-3 と同様

ERI：今回の観測結果

表 4-6 やぎ座  $\alpha$  流星群 (CAP)

	開始	終了	極大	赤経(°)	Ra dr	赤緯(°)	Dec dr
CAP			123.2	304.4		-12.7	
Pokorný et al. 2017	105	131	127	305.6	0.60	-9.4	0.21
Jenniskens et al. 2016	101	138	127	306.5	0.97	-9.2	0.24
Molau & Kerr 2014	106	137	122	303.9	0.55	-11.4	0.25

開始・極大・終了、赤経・赤緯、Ra dr と Dec dr の表現は、表 4-3 と同様

CAP：今回の観測結果

表 4-7 じょうぎ座 $\gamma$ 流星群 (GNO)

	開始	終了	極大	赤経(°)	Ra dr	赤緯(°)	Dec dr
GNO			353.5	258.1		-48.1	
G & E 1975-1			358.7	263.1		-56	
G & E 1975-2			359.7	252		-42.7	
Jenniskens 2006			352.7	251.6	1.3	-51.3	-0.1
Molau & Kerr 2014	2	7	4	246	1.3	-51	0.8

開始・極大・終了、赤経・赤緯、Ra dr と Dec dr の表現は、表 4-3 と同様

GNO：今回の観測結果

G & E 1975-1 と G & E 1975-2 は Gartell & Elford 1975 の二つの association の値

表 4-8 南のかんむり座流星群 (CAU)

	開始	終了	極大	赤経(°)	Ra dr	赤緯(°)	Dec dr
CAU			51.5	288.8		-36.4	
IAU MDC CAU(# 0146)			54.7	285.1	1.1	-39.9	0
Jenniskens 1994	52	59	56	284	1.3	-40	0.1

開始・極大・終了、赤経・赤緯、Ra dr と Dec dr の表現は、表 4-3 と同様

CAU：今回の観測結果

表 4-9 ほうおう座と流星群 (ZPH)

	開始	終了	極大	赤経(°)	Ra dr	赤緯(°)	Dec dr
ZPH			104.2	10.1		-55.8	
Pokorný et al. 2017	96	108	105	13.7	0.84	-52.8	0.42

開始・極大・終了、赤経・赤緯、Ra dr と Dec dr の表現は、表 4-3 と同様

ZPH：今回の観測結果

表 4-10 新たに検出された輻射点

No.	出現日	赤経(°)	赤緯(°)	広がり(°)	流星数
1	37.9	346.9	-55.8	0.4	6
2	38.9	300.8	-51.3	0.3	5
3	40.9	294.2	-68.9	1.0	5
4	42.8	274.3	-64.6	0.9	10
5	41.8	293.9	-29.3	0.5	5
6	73.3	269.2	-48.2	0.7	6
7	72.7	328.0	-70.3	0.6	6
8	150.6	58.6	-20.7	1.5	6
9	170.4	40.9	-59.9	1.2	5

出現日は太陽黄経 (J2000.0) で表示

赤経・赤緯は輻射点の位置 (J2000.0)

表 4-11 新たに検出された輻射点 No.8 と EER

	開始	終了	極大	赤経(°)	Ra dr	赤緯(°)	Dec dr
新輻射点 No.8			151	58.6		-20.7	
IAU MDC EER #0209			170	56.6	0.7	-13.8	0.2
Rendtel et al. 1995			155.7	52		-15	
Jenniskens 1994			154(152)	52	0.8	-15	0.3
Jenniskens 2006			167	56.6		-13.8	
Drummond 1981			168.8	53		-15	

開始・極大・終了、赤経・赤緯、Ra dr と Dec dr の表現は、表 4-3 と同様

Jenniskens 1994 では極大が掲載されている二つのリスト太陽黄経 154 度と 152 度と異なる値が出ている。

Drummond (1981)は C/1854 L1 Klinkerfues 彗星からの予報値



## 5 結論

序章の歴史的経過で見たように流星群と彗星との関連は19世紀には指摘されてきたところであった。しかしながら、流星群の誕生とその進化を流星体がどのようにして親天体から放出されるのか、また、その放出された流星体自体がどのように進化していくのかという観点からの研究は、1999年のしし座流星群の大出現の前までは大きな進捗は見られなかった。これを大きく飛躍させたのがダストトレイル理論であった。ダストトレイル理論では、流星群の形成から進化の過程を親天体からのダストトレイルの形成と進化の過程として再構成した。そしてモデル粒子を使っての具体的な計算により過去の流星群の大出現の検証と将来の出現予報が可能となった。本研究では、このダストトレイル理論と実際の流星群の観測とを組み合わせることで比較検討を加えることにより以下の研究をおこなった。最初に、親彗星から高速で放出された流星体からなるダストトレイルからの流星群の出現予報の検証を観測からおこなうとともに、そのような流星群の特性についての研究を行った。さらにはダストトレイルから流星群予報と流星群の観測から親天体の過去の活動履歴を調べる新しい手法によりこれまでに明らかでなかった親彗星の物理的進化という太陽系小天体の課題の解明に取り組んだ。具体的な観測的研究から得られた結果は次のとおりである。

しし座流星群の過去の出現をダストトレイル理論で検証したこれまでの研究からは、大流星群が見られたほとんどのケースで、流星体の親天体からの放出速度は  $15\text{m s}^{-1}$  以内であった。1965年に親天体から約  $89\text{m s}^{-1}$  という速い速度で放出された流星体からなるダストトレイルが1回帰後の2002年に地球に接近することが予報された。高感度ビデオカメラによる観測により、このダストトレイルによると考えられる6等から8等の暗い流星を主とする活発な流星群活動を捉えた。これは肉眼では見えない暗い流星が主体の流星群の大出現を捉えた世界最初のケースであった。また、このような高速で放出された流星体のその放出速度に対応する光度分布を初めて明らかにした。

2012年と2011年のりゅう座流星群の活動を違いについて、2012年の結果とダストトレイルによる予報との比較と2011年のMUレーダーでの観測とダストトレイル予報との検討結果を組み合わせることで考察した。その結果、MUレーダーの観測から得られたレーダー散乱断面積の分布の比較から2012年は2011年より質量の小さい流星体が多かったことが判明した。このことは、2011年の出現をもたらしたダストトレイルは親天体からの流星体の放出速度が約  $8\text{m s}^{-1}$  であったのに対して2012年は  $43\sim 51\text{m s}^{-1}$  と高速であったことが原因であると考えられる。この結果は、親天体からの速い放出速度が観測された流星体の質量分布を決定したという点では2002年のしし座流星群での研究を裏付けるものとなった。親天体からの流星体の放出速度と観測される流星(流星体)の光度(質量)分布との関連に係る研究は、流星群の誕生と構造を明らかにするとともに、親天体の流星体放出時の活動状況を知る上でも重要であることを示している。

彗星の物理的な進化を流星群の出現から推測するという新たに考案された手法を289P/Blanpain彗星とほうおう座流星群に適用した。ダストトレイル理論から20世紀初頭

にこの天体から放出された流星体によるほうおう座流星群の活動が 2014 年 12 月に起こることが予報された。この流星群の有無と規模を観測することにより、20 世紀初頭にこの天体がすでに枯渇彗星となっていたのか、あるいは彗星として活動をしていたのか、またその活動度を推測することが可能となった。アメリカ東海岸で実施した流星群の観測結果により、1956 年の観測の 1/10 以下と弱かったが、明瞭な流星群活動が検出された。このことからほうおう座流星群の親天体の 289P/Blanpain 彗星は、20 世紀初頭には弱いながらも彗星活動を行っていたことが判明した。この研究は、流星群活動から親天体の過去の活動度を明らかにした初めてのケースとなった。

最後に、2012 年度に第 53 次日本南極地域観測隊での公開利用研究として実施した南極昭和基地での南天で活動する流星群の光学観測結果についてまとめた。流星群の観測はこれまで主として北半球で行われてきたので、南天での流星群の観測は不十分であった。南天で活動する流星群の観測、特に新流星群を見出すことは、これまでの章で取り上げてきた研究のための基本的なデータを得るという意味で重要である。今回の観測は、1 シーズンのみの観測であり、また 1 点からの観測ではあったが、観測データが得られた 234 夜中 114 夜 (49%) で流星が検出された。流星群の検出法は、眼視観測で用いられているものを応用した。眼視観測に比べて、ビデオ観測による流星の経路測定は高精度ではあるが、より多くの流星輻射点を検出可能とするために検出条件を最適化した。その結果、60 のデータセットから 32 個の輻射点を検出した。検出した輻射点のうち、17 個は 4 つの確定流星群、3 個は 3 つの未確定流星群と同定され、この検出法および検出条件の有用性を示すことができた。今回検出したこれまで観測されていない 9 つの輻射点については今後の観測・研究への足掛かりとなると考える。

以上の研究を踏まえて、次のような課題に今後取り組むべき事項を挙げておく。

- (1)ダストトレイル理論にもとづくシミュレーション 今回の研究では、ダストトレイル理論による流星群の出現の再現と予報については、他の研究者により行われて公表された結果を用いてきた。研究の柔軟性や範囲を広げるためにダストトレイル理論によるシミュレーションを実施して今後の研究では具体的にその結果を取り入れていくことが重要である。
- (2)南天で活動する流星群のビデオ観測 今回の観測は、南極での 1 シーズンだけの観測であった。変化していく流星群の活動の観測や突発的な大出現を捉えるためには、南半球での定常的な流星のビデオ観測の実施を検討する必要がある。
- (3)PANSY レーダーによる流星のヘッドエコー観測 南極昭和基地に設置され運用されている PANSY レーダーは、第 2 章の研究で用いた MU レーダーと同様の大型大気観測レーダーである。PANSY レーダーは第 2 章で実施した MU レーダーと同様な流星のヘッドエコー観測をおこなうことができる。現在、PANSY レーダーで得られヘッドエコーの解析法が開発中であり、将来的には、第 3 章で取り上げたような流星群の出現予報による観測を実施することが重要である。

## 謝辞

本博士論文をまとめるにあたり、主任指導教員の国立極地研究所・総合研究大学院大学中村卓司教授には、終始一貫して懇切丁寧なご指導と多大なるご助言をいただきました。ここに心より深く感謝いたします。中村卓司教授には、1994年に日本天文学会内地留学奨学金による内地留学でご指導をいただいて以来、研究の視点・アプローチの仕方、観測計画の企画、観測結果の解釈、論文の書き方等研究のすべての面で長年にわたりご指導をいただきました。また、常に暖かい励ましのお言葉もいただきました。あらためて、公私にわたるご厚情に心より厚くお礼申し上げます。

本論文の審査委員で副指導教員でもある堤雅基教授には、本研究をまとめるにあたって終始懇切なご指導と多くの助言をいただきました。また、常日頃から、研究を進めるにあたって大局的な見地から多くの示唆とご助言をいただきました。

国立極地研究所・総合研究大学院大学の江尻省助教には、本論文の審査委員として、多大なるご助言をいただきました。また、常日頃から、本研究を行う上で、現象の解釈、表現方法等において多くのご意見、ご助言をいただきました。

国立天文台・総合研究大学院大学の渡部潤一教授には、本論文の審査員として有益なご助言をいただきました。また、渡部教授からは、主宰されている国立天文台での太陽系小天体セミナーにおいて流星天文学のみならず太陽系小天体研究全般について多くのご指導とご助言をいただきました。

本論文の審査員の高知工科大学の山本真行教授には、論文作成にあたり有益なご助言をいただくとともに、流星天文学全般にわたって議論をしていただきました。

国立極地研究所・総合研究大学院大学の富川喜弘准教授、西山尚典助教には、研究状況の進捗報告会の日程調整をはじめ、研究を円滑に進めるうえで大変お世話になりました。

日本流星研究会の上田昌良氏には、しし座流星群のビデオ観測の計画、実施、解析のすべての段階で共同して取り組んでいただき、観測データの提供を受けました。投稿論文執筆にあたって多大なるご助言をいただきました。また、流星の軌道計算にかかるパソコンプログラムの提供を受けました。

Swedish Institute of Space Physics の Johan Kero 博士には、MU レーダーヘッドエコー観測データの 1 次処理を行っていただくとともに、投稿論文執筆に当たって多くの助言をいただきました。

首都大学東京の阿保真教授には、MU レーダーによる 10 月りゅう座流星群の観測計画の企画・立案でお世話になりました。

京都大学生存圏研究所所属の MU レーダーでの流星電波観測の実施にあたりましては、山本衛教授、橋口博之教授、矢吹正教助教、葛江寛也氏をはじめ信楽 MU 観測所関係者の皆さまのお世話になりました。

日本流星研究会の植原敏氏と嵯峨山亨氏には、ほうおう座流星群のアメリカ遠征観測の計画から実施にわたり共同して取り組んでいただき、観測データの提供を受けました。国立天文台岡山天体物理研究所の戸田博之氏からは、ほうおう座流星群の観測データの提供を受けました。日本放送協会（NHK）の長谷英里子氏と増本英幸氏からは、ほうおう座流星群の観測にあたりご協力をいただくとともに、NHK 撮影のハイビジョン映像の提供を受けました。

南極昭和基地でのビデオ観測では、第53次南極地域観測隊の大市聡氏と三浦夏美氏には、観測機材の設置、管理、撤収まで全面的にお世話になりました。また、機材の梱包から輸送等で観測隊関係者の皆さまにお世話になりました。

ビデオ画像から自動で流星を検出するソフトウェアの UFOCapture シリーズの開発者である SonotaCo 氏からは、ソフトウェアの使用にあたって有益な助言をいただきました。

司馬康生氏からは、全天カメラの画像からの流星の位置を測定するプログラムの提供を受けました。

佐藤幹哉氏からは、ダストトレイル理論による流星群の出現予報について多くの議論と助言をいただきました。

故長谷川一郎博士からは、長年にわたり流星天文学のみならず天文学一般について多くのご教示をいただきました。また、総研大で研究を行うにあたり常に励ましのお言葉をいただきました。

国立極地研究所宙空圏研究グループの教員、研究員、事務補佐員ならびに学生諸氏には、日常の研究活動中に多くの激励とご協力をいただきました。

ここに心より深く感謝の意を表します。

最後に、私の総研大での研究に対する要望を受け入れて研究優先の単身生活を許してくれた家族に深く感謝します。そして最後まで総研大での研究を支えてくれた妻佐和子に本論文を捧げます。

## 引用文献

- Andreić, Ž., Gural, P., Šegon, D., Skokić, I., Korlević, K., Vida, D., Novoselnik, F., & Gostinski, D., 2014, WGN, 42, 90
- Arlt, R., Bellot Rubio, L., Brown, P., & Gyssens, M., 1999, WGN, 27, 286
- Arlt, R., Kac, J., Krumov, V., & Verbert, J., 2001, EGN, 29, 187
- Asher D. J., 2000, in Arlt R., ed Proc. Int. Meteor Conf., Frasso Sabino, Italy, 23-26  
September 1999, Int. Meteor Organization
- Beijing Observatory ed., 1988, General Compilation of Chines Ancient Astronomical Record (中国  
古代天象記錄總集, 江蘇科學技術出版社
- Branham Jr., R. L., 2013, PSS, 85, 289B
- Brown, P., 1999, ICARUS, 138, 287
- Brown, P., Weryk, R. J., Wong, D. K., & Jones, J., 2008, ICARUS, 195, 317
- Brown, P., Campbell, M., D., Hawkes, R. L., Theijsmeijer, C., & Jones, J., 2002a, PSS, 50, 45
- Brown, P., Campbell, M., Suggs, R., Cooke, W., Theijsmeijer, C., Hawkes, R. L., Jones, J. & Ellis,  
K. J., 2002b, MNRAS, 335, 473
- Brown, P., Wong, D. K., Weryk, R. J., & Wiegert, P., 2010, ICARUS, 207,66
- Campbell, M., Theijsmeijer, C., Jones, J., Hawkes, R. L., & Brown, P., 2001, in Proc. of the Meteoroids  
2001 Conference, Swedish Institute of Space Physics, Kiruna, Sweden, 9-10, August 2001 (ESA  
SP-495), 197
- Cepelcha, Z., Borovička, J., Elford, W. G., Revelle, D. O., Hawkes, R. L., Porubčan, V. & Šimek, M.,  
1998, Space Science Reviews, 84, 327
- Chau J. L. & Woodman R. F., 2004, Atmos. Chem. Phys., 4, 511
- Chau J. L. & Galindo F., 2008, Icarus, 194, 23
- Close S., Hunt S. M. Minardi M. J. & McKeen F. M., 2000, Icarus, 168, 43
- Close S., Brown P., Campbell-Brown M., Oppenheim M. & Colestock P., 2007, Icarus, 186,  
547
- Ellyett, C. D. & Roth, K. W., 1955, Aust. J. Phys, 8, 390
- Drummond, J. D., 1981, Icarus, 47, 500
- Foglia, S., Micheli M., Ridley, H. B., Jenniskens, P., & Marsden, B. G., 2005, IAU Circ., 8485
- Fujiwara, Y., 1993, in Meteoroids and their Parent Bodies, ed. Štohl, J. & Williams, I. P. (Bratislava:  
Astron. Inst. Slovak Acad. Sci.) 265
- Fujiwara, Y., Ueda, M., Shiba, Y., Sugimoto, M., Kinoshita, M., Shimoda, C. & Nakamura, T.,  
1998, GRL, 25, 285
- Fujiwara, Y., Ueda, M., Kawasaki, Y. & Nakamura, T., 2003, PASJ, 55, 1157
- Fujiwara, Y., Kero, J., Abo, M., Szasz, C. & Nakamura, T., 2016, MNRAS, 455, 3273

- Fujiwara, Y., Nakamura, T., Uehara, S., Sagayama, T., Toda, H. & the NHK Cosmic Front TV Crew, 2017, PASJ, 69, doi: 10.1093/pasj/psx035
- Galligan, D. P., 2003, MNRAS, 340, 899
- Galligan, D. P., & Baggaley, W. J., 2005, MNRAS, 359, 551
- Gartrell, G., & Elford, W. G., 1975, Aust. J. Phys., 28, 591
- Gural, P., Šegon, D., Andreić, Ž., Skokić, I., Korlević, K., Vida, D., Novoselnik, F., & Gostinski, D., 2014, WGN, 42, 132
- Hasegawa, I., 1990, PASJ, 42, 175
- Hawkes, R. L. & Jones, J., 1986, Quart. J. Roy. Astr. Soc., 27, 569
- Hawkes, R. L., 1993, in Meteoroids and their Parent Bodies, ed. Štohl, J. & Williams, I. P. (Bratislava: Astron. Inst. Slovak Acad. Sci.) 227
- Hey J. S., Parsons S. J., & Stewart G. S., 1947, MNRAS, 107, 176
- Hughes, D. W., 1978, in Cosmic Dust ed. McDonnell, J. A. M., John Wiley & Sons, Chapter 3
- Huruhata, M. & Nakamura, J., 1957, Tokyo Astron. Bull., 2nd Ser., No .99
- Ishiguro, M., Watanabe, J., Usui, F., Tanigawa, T., Kinoshita, D., Suzuki, J., Nakamura, R., Umeno, M. & Mukai, T., 2002, ApJ, 572, L117
- Jacchia, L. G., Verniani, F. & Briggs, R. E., 1967, Smithson. Contr. Astrophys, 10, 1
- Janches D., Heinselman C. J., Chau J. L., Chandran A. & Woodman R., 2006, J. Geophys. Res., 111, A07317
- Janches, D., Hormaechea, J. L., Brunini, C., Jocking, W. & Fritts, D. C. 2013, Icarus, 223, 677
- Janches D., Hocking W., Pifko S., Hormaechea J. L., Fritts D. C. & Brunini C., J. Geophys. Res (Space Physics), 2014, 10.1002, 2013JA019241
- Jenniskens, P., 1994, A & A, 287, 990
- Jenniskens, P. & Butow, S. J., 1999, Meteorit. Planet. Sci., 34, 943
- Jenniskens, P. & Butow, S. J. & Fonda, M., 2000, Earth, Moon, Planets, 82/83, 1
- Jenniskens, P. & Lyytinen, E., 2005, AJ, 130, 1286
- Jenniskens P., 2006, Meteor Showers and Their Parent Comets. Cambridge Univ. Press, Cambridge
- Jenniskens, P., 2008, Earth, Moon, & Planet, 102, 5
- Jenniskens, P., Gural, P. S., Dynneson, L., Grigsby, B. J., Newman, K. E., Borden, M., Koop, M. & Holman, D., 2011, Icarus, 216, 40
- Jenniskens, P., Nénon, Q., Gural, P. S., Albers, J., Haberman, B., Johnson, B., Holman, D., Morales, R., Grigsby, B. J., Samuels, D. & Johnnink, C., 2016a, Icarus, 266,331
- Jenniskens, P. Nénon, Q., Gural, P. S., Albers, J., Haberman, B., Johnson, B., Holman, D., Morales, R., Grigsby, B. J., Samuels, D. & Johnnink, C., 2016b, Icarus, 266,355
- Jenniskens, P. Nénon, Q., Gural, P. S., Albers, J., Haberman, B., Johnson, B., Holman, D.,

- Morales, R., Grigsby, B. J., Samuels, D. & Johnnink, C., 2016c, *Icarus*, 266,384
- Jenniskens, P., Baggaley, J., Crumpton, I., Aldous, P., Gural, P. S., Samuels, D. Albers, J. & Soja, R., 2016d, *WGN*, 44, 35
- Jewitt, D., 2006, *AJ*, 131, 2327
- Jopek, T. J., Koten, P. & Pecina, P., 2010, *MNRAS*, 404, 867
- Jopek, T., J & Kaňuchová, Z., 2017, *PSS*, 143, 3
- Kazimircuk-Polonskaja, E., Beljaev, N. A., Astapovic, I. S. & Terenteva, A. K., 1968, in *Physics and Dynamics of Meteors*, ed. Kresák, L. & Millman, P., Dordrecht, Reidel, 449
- Kero J., Szasz C., Wannberg G., Pellinen-Wannberg A. & Westman A., 2008, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L07101
- Kero J., Szasz C., Nakamura T., Meisel D. D., Ueda M., Fujiwara Y., Terasawa T., Miyamoto H. & Nishimura K., 2011, *MNRAS*, 416, 2550
- Kero J., Fujiwara Y., Abo M., Szasz C. & Nakamura T., 2012a, *MNRAS*, 424, 1799
- Kero J., Szasz C., Nakamura T., Terasawa T., Miyamoto H. & Nishimura K., 2012b, *Ann. Geophys.*, 30, 639
- Kero J., Szasz C. & Nakamura T., 2013, *Ann. Geophys*, 31, 439
- Kondrat'eva, E. D. & Reznikov, E., A., 1985, *Astronomicheskij Vestnik*, 19, 144
- Koten P., Vaubaillon J., Tóth J. Margonis A. & Ďuriš F., 2014, *Earth, Moon, Planets*, 112,15
- Kozai, Y., 2002, *Proc. Japan Acad.*, 78, B, 33
- Kronk, G. W., 2014, *Meteor Showers An Annotated Catalog Second Edition*, (New York, Springer)
- Kresák, L., 1968, in *IAU Symp. 33, Physics and Dynamics of Meteors*, ed. L. Kresák & P. M. Millman (Dordrecht: D. Reidel Publishing Co.),
- Kresák, L., & Porubčan, V., 1970, *Bull. Astron. Inst. of Czechoslovakia*, 21, 153
- Lyytinen, E., 1999, *Mata Res Bull.*, 8, 33
- Maslov M., 2011, *WGN*, 39, 64
- Mason, J. M., 1995, *JBAA*, 105, 5
- Mathews J. D., Meisel D. D., Hunter K. P., Getman V. S. & Zhou Q., 1997, *Icarus*, 126, 157
- McIntoch, R. A., 1935, *MNRAS*, 95, 709
- McKinley, D. W. R., 1961, *Meteor Science and Engineering*, (New York: McGraw-Hill Book Company Inc.)
- McNaught, R. H. & Asher, D. J., 1999, *WGN*, 27, 85
- McNaught, R. H. & Asher, D. J., 2001, *WGN*, 29,156
- Molau, S., Rendtel, J. & Nitschke, M., 1999, *WGN*, 27, 296
- Molau, S. & SonotaCo, 2008, *WGN*, 36, 124
- Molau, S. & Rendtel, J., 2009, *WGN*, 37, 98

- Molau S. & Barentsen G., 2014, *Earth, Moon, Planets*, 112, 1
- Molau, S. & Kerr, S., 2014, *WGN*, 42, 68
- Molau S., 2015, *WGN*, 43, 62
- Murakami, T., 1955, *PASJ*, 7, 49
- Myers, J. R., Sande C. B., Miller A. C. Warren Jr. W. H. & Tracewell D. A. 2002, Goddard Space Flight Center, Flight Dynamics Division
- Nagasawa, K. & Kawagoe, A. 1987, *Icarus*, 70, 138
- Nilsson, C. S., 1964, *Aust. J. Phys.*, 17, 226
- Ohtsuka, K., Tanigawa, T., Murayama, H. & Hasegawa I., 2001 in *Proc. of the Meteoroids 2001 Conference*, Swedish Institute of Space Physics, Kiruna, Sweden, 9-10, August 2001 (ESA SP-495), 109
- Olivier, C. P., 1925, *Meteors*, (Baltimore: Williams & Wilkins Company)
- Pellinen-Wannberg A. & Wannberg G., 1994, *J. Geophys Res.* 99, 11379
- Rendtel, J., 1996, in *Proc. IMC Brandenburg 1995*, ed. P. Roggemans and A. Knöfel, 72
- Ridley, H. B., 1957, *Circ. Brit. Astron. Assoc.*, No. 382
- Ridley, H. B., 1962, *J. Brit. Astron. Assoc.*, 72, 266
- Pokorný, P., Janches, D., Brown, P. G., & Hormaechea, J. L., 2017, *Icarus*, 290, 162
- Rudawska, R., Matlovič, P., Tóch, J., & Kornoš, L., 2015, *Planet. Space. Sci.*, 118, 38
- Sarugaku, Y., Ishiguro, M., Ueno, M., Usui, F. & Reach, W. T., 2015, *ApJ*, 804:127
- Sato, T., Nakamura, T. & Nishimura, T., 2000, *IEICE Trans. Commun.*, E83-B, 9, 2000
- Sato, M., 2003, *WGN*, 31, 59
- Sato, M. & Watanabe, J., 2010, *PASJ*, 62, 509
- Sato, M. & Watanabe, J., 2014, in *Proc. Meteoroids 2013*, ed. T. Jopek et al. (Poznan: Adam Mickiewicz University Press), 329
- Schult, C., Stober, G., Chau, J. L. & Latteck, R., 2013, *Ann. Geophys.*, 31, 1843
- Schult, C., Stober, G., Janches, D. & Vhau, J. L., 2017, *Icarus*, 297, 1
- Šegon, D., Andreić, Ž., Gural, P., Skokić, I., Korlević, K., Vida, D., Novoselnik, F. & Gostinski, D., 2014, *WGN*, 42, 227
- Shain, C. A., 1957, *Observatory*, 77, 27
- Skyes, M., V. & Lien, D., J., 1990, *ICARUS*, 86, 236
- SonotaCo, 2009, *WGN*, 37, 55
- SonotaCo, 2016, *WGN*, 44, 42
- Sparks, J. J., Janches, D., Nicolls, M. J. & Heinselman, C. J., 2010, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phy.*, 72, 1221
- Spurný, P., Betlem, H., Van't Leven & Jenniskens, P., 2000, *Meteoritics Planet. Sci.*, 35, 243
- Stoney, J. & Downing, A. M., 1899, *ApJ*, 9, 203



- Suzuki, H., Nakamura, T., Vadas, S., Tsutsumi, M., Taguchi, M., & Fujiwara, Y., 2013, *JGR Atmos.* 118, 3047
- Szasz, C., Kero, J., Meisel, D. D., Pellinen-Wannberg, A., Wannberg, G. & Westman, A., 2008, *MNRAS*, 388, 15
- Trigo-Rodríguez, J. M., Madiedo, J. M., Williams, I. P., Dergham, J., Cortés, J., Castro-Tirado, A. J., Ortiz, J. L., Zamorano, J., Ocaña, F., Izquierdo, J., de Miguel, A. S., Alonso-Azcárate, J., Rodríguez, D., Tapia, M., Pujols, P., Lacruz, J., Pruneda, F., Oliva, A., Erades, J. P. & Marín, A. F., 2013, *MNRAS*, 433, 560
- Vaubailion, J., Colas, F. & Jorda, L., 2005a, *A&A*, 439, 751
- Vaubailion, J., Colas, F. & Jorda, L., 2005b, *A&A*, 439, 761
- Vaubailion, J., Watanabe, J., Sato, M., Horii, S. & Koten, P., 2011, *WGN*, 39, 59
- Venter, S. C. 1957, *Mon. Not. Astron. Soc. Southern Africa*, 16, 6
- Watanabe, J., Sekiguchi, T., Shikura, M., Naito, S., & Abe, S. 2002, *PASJ*, 54, L23
- Watanabe, J., 2005, *Earth, Moon, & Planet*, 95, 49
- Watanabe, J., Sato, M. & Kasuga, T., 2005, *PASJ*, 57, L45
- Weissman, P. R., Bottke, W. F. Jr. & Levison, H. F., 2002, in *Asteroids III*, Bottke, W. F. Jr., Cellino, A., Paolicchi, and Binzel, R. P., ed. University of Arizona Press, Tucson, 669
- Weis, A. A., 1955, *Aust. J. Phys.*, 8, 148
- Weise, A. A., 1958, *Aust. J. Phys.*, 11, 113
- Wood, J., 1987, *WGN*, 15, 129
- Wood, J., 1984, *WGN*, 12, 74
- Ye, Q., Brown, P. G., Campbell-Brown, M. D. & Weryk, R. J., 2013, *MNRAS*, 436, 675
- Ye, Q., Wiegert, P. A., Brown, P. G., Campbell-Brown, M. D. & Weryk, R. J., 2014, *MNRAS*, 437, 3812
- Yeomans, D., K., 1981, *ICARUS*, 47, 492
- Younger, J. P., Reid, I. M., Vincent R. A., Holdsworth, D. J. & Murphy D. J. 2009, *MNRAS*, 398,350

- 飯山青海, 1998, 天文回報 (日本流星研究会), 667号, 6
- 飯山青海, 1999, 天文回報 (日本流星研究会), 679号, 9
- 飯山青海, 2000, 天文回報 (日本流星研究会), 691号, 9
- 飯山青海, 2001, 天文回報 (日本流星研究会), 703号, 7
- 飯山青海, 2002, 天文回報 (日本流星研究会), 715号, 7
- 飯山青海, 2003, 天文回報 (日本流星研究会), 728号, 3
- 古在由秀, 2002, 天文ガイド, 464号 (2002年10月号), 174
- 小槇孝二郎・藪保男 (増補), 1971, 流星とその観測、恒星社厚生閣

- 佐藤亨, 2000, レーダー, 宇宙工学シリーズ 1, 宇宙における電波計測と電波航法、コロナ社, 第 2 章
- 佐藤幹哉, 2011, 川崎市青少年科学館紀要, 22, 5
- 寺田充, 1984, 流星の軌道計算, 流星 II -解析と理論-, 斎藤馨児・長沢工 編 (恒星社厚生閣), 第 3 章
- 長沢工, 1978, 東京天文台報, 第 18 卷, 446
- 中野圭一, 2002, 天文ガイド, 464 号 (2002 年 10 月号), 174
- 長谷川一郎, 1983, 天体軌道論, 恒星社厚生閣
- 長谷川一郎, 2002, 天文計算入門, 恒星社厚生閣
- 深尾昌一郎・浜津享助, 2005, 気象と大気のレーダーリモートセンシング, 京都大学学術出版会
- 渡部潤一, 1998, しし座流星雨がやってくる, 誠文堂新光社
- 渡部潤一・佐藤幹哉・春日敏測, 2006, 天文月報, 第 99 卷 第 11 号, 629
- 渡部潤一, 2008, 太陽系と惑星, 渡部潤一・井田茂・佐々木晶 編 (日本評論社), 第 1 章第 1 節, 第 5 章第 4 節
- 渡部潤一・渡部好恵, 2016, 最新 惑星入門, 朝日新聞出版